



A Robust MINLP Model for Production-Distribution Planning in Three-Echelon Supply Chain

Kami Sasanian¹ , Mehdi Jalali-Nasab², Ardeshtir Ahmadi^{3*} , Amir Radfar⁴, Hossein Rezaei⁵

¹ Ph.D. Students, Industrial Engineering and Systems Optimization, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email Address: taha.sasanian@gmail.com

² Ph.D. Students, Industrial Engineering and Systems Optimization, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email Address: m.jalalinasab@gmail.com

³ Correspondence: Associate Professor, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email Address: ar.ahmady@eyc.ac.ir

⁴ Ph.D. in Industrial Management (Production and Operations) Islamic Azad University, Roudehen Branch, Tehran, Iran. Email Address: a.radfar@gmail.com

⁵ M.Sc. in Industrial Management (Production and Operations) Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran. Email Address: .rezaei@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 30 October 2025

Received in revised form: 17 December 2025

Accepted: 29 July 2026

Available online: 16 September 2026

Keywords:

Robust optimization

Uncertainty

Mixed-Integer Nonlinear Programming

Bertsimas-Sim

Multi-echelon supply chain

ABSTRACT

This research presents a robust optimization model for integrated production-distribution planning in a three-echelon supply chain network comprising suppliers, manufacturers, and distributors. By employing the Bertsimas-Sim robust optimization approach, uncertainties in demand and transportation costs across four transportation modes (road, rail, maritime, and air) are managed to maximize net profit. The proposed Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) model is solved using GAMS/BARON version 12.6 optimization software for four uncertainty levels ($\rho=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) across five randomly generated scenarios. Comparative analysis of deterministic and robust models indicates that the robust model reduces standard deviation by 62 to 65 percent, while only resulting in a 0.75 to 1.79 percent reduction in average profit. Findings demonstrate that the robust model achieves a superior risk-return ratio and improves the coefficient of variation by over 60 percent across all uncertainty levels, making it highly effective for high-uncertainty business environments.

Cite this article: K. Sasanian, M. Jalali-Nasab, A. Ahmadi, A. Radfar, and H. Rezaei, "A Robust MINLP Model for Production-Distribution Planning in Three-Echelon Supply Chain, vol. 28, no. 2, pp. 21-37, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1669>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
Publisher: Imam Hossein University

Introduction

Background and Motivation

Integrated production-distribution planning in supply chain management represents one of the most challenging and critical decision-making problems in modern business operations. The coordination of production activities with distribution strategies is essential for achieving optimal supply chain performance. However, real-world supply chain systems operate under significant uncertainty, particularly in demand patterns and transportation costs, which can severely impact operational efficiency and profitability.

Traditional deterministic optimization approaches assume perfect information about all parameters, which rarely holds in practice.

Market volatility, seasonal fluctuations, geopolitical factors, and economic conditions create substantial uncertainty in demand forecasting.

Similarly, transportation costs vary dynamically due to fuel price fluctuations, capacity availability, and external disruptions. These uncertainties can lead to infeasible solutions, substantial profit losses, and operational disruptions when deterministic models are employed.

While extensive research exists on supply chain optimization, several critical gaps remain. Most existing models consider single or dual transportation modes, neglecting the complexity of multi-modal logistics systems. Many robust optimization studies focus on demand uncertainty alone, overlooking the critical role of transportation cost variability. Furthermore, few studies systematically evaluate the price of robustness across multiple uncertainty levels or address the simultaneous optimization of production and distribution decisions under joint uncertainty. This research addresses these gaps by developing a robust MINLP model for integrated production-distribution planning in a three-echelon supply chain. The model incorporates four transportation modes and explicitly considers uncertainty in both demand and transportation costs using the Bertsimas-Sim approach. The study systematically evaluates robustness performance across multiple uncertainty levels to provide practical insights for decision-makers operating in volatile business environments.

Primary Objective

Develop a robust optimization model for integrated production-distribution planning in a three-echelon supply chain under demand and multi-modal transportation cost uncertainty

Secondary Objectives

Compare robust and deterministic model performance across varying uncertainty levels

Quantify the price of robustness and risk-return trade-offs

Provide managerial insights for decision-making under uncertainty

Research Questions

Main Research Question

How can a robust optimization framework be developed for integrated production-distribution planning in multi-echelon supply chains under demand and transportation cost uncertainty?

Sub-Questions

1. Which model (deterministic vs. robust) performs better in high-uncertainty business environments?
2. How can optimal balance between profitability and stability be achieved?
3. What is the quantitative trade-off between risk reduction and profit maximization?

Contributions

This research makes several significant contributions:

1. Methodological Innovation: Develops a robust MINLP model incorporating Bertsimas-Sim approach for multi-modal transportation systems

2. Practical Insights: Provides quantitative analysis of price of robustness (PoR < 2%) for real-world implementation

3. Comprehensive Evaluation: Systematically compares deterministic and robust models across four uncertainty levels.

4. Decision Support: Offers actionable guidelines for supply chain managers operating under uncertainty.

1.6 Paper Structure

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 reviews relevant literature, Section 3 presents the mathematical formulation, Section 4 describes the solution methodology, Section 5 discusses computational results, and Section 6 concludes with managerial implications and future research directions.

Methodology

Research Design

This research follows a quantitative, mathematical modeling approach and is classified as applied-developmental research aimed at improving existing models and providing practical operational solutions. The methodology comprises four main phases: problem formulation, model development, computational implementation, and comparative analysis.

Problem Description

Supply Chain Structure

The study considers a three-echelon supply chain network with the following characteristics:

Producers ($i \in I$): Two manufacturing facilities with limited production capacity

Distributors ($j \in J$): Two distribution centers with storage capacity constraints

Consumers ($k \in K$): Two end-customer zones with uncertain demand

Products ($p \in P$): Two different product types

Planning Horizon ($t \in T$): Three-month period (quarterly planning)

Transportation Modes ($m \in M$): Four options (road, rail, maritime, air)

Key Assumptions

- 1. Uncertainty:** Demand and transportation costs are uncertain; probability distributions are unknown
- 2. No Shortage:** Backorders and delivery delays are not permitted
- 3. Fixed Workforce:** Labor levels remain constant; production occurs during regular hours only

4.Negligible Lead Time: Transportation time is considered insignificant

5.Mode Selection: Exactly one transportation mode must be selected per route per period

6.No Long-term Storage: Distributors hold inventory only for the current period.

Experimental Design

The computational experiment follows this protocol:

1-Scenario Generation: Generate 5 random scenarios for each uncertainty level

2-Deterministic Solve: Solve deterministic model for each scenario

3-Robust Solve: Solve robust model once per uncertainty level

4-Performance Calculation: Compute metrics across all scenarios

5-Comparative Analysis: Evaluate trade-offs between models.

Validation and Verification

Model validity is ensured through:

Mathematical Verification: Constraint satisfaction and optimality conditions

Sensitivity Analysis: Parameter variation testing

Benchmark Comparison: Results comparison with literature

Managerial Review: Practical feasibility assessment

Medium-term Developments

Two-Stage Stochastic-Robust Models: Combine stochastic programming with robust optimization for better uncertainty representation

Dynamic Robust Optimization: Extend to multi-period planning with recourse decisions and learning mechanisms

Network Design Integration: Simultaneously optimize facility location and production-distribution planning

Concluding Remarks

This research demonstrated that robust optimization provides a powerful and practical framework for integrated production-distribution planning under uncertainty. The Bertsimas-Sim approach successfully balances conservatism and optimality, achieving substantial risk reduction (62-65%) with minimal profit sacrifice (<2%).

The key insight is that robustness is not expensive – organizations can significantly enhance operational stability without compromising profitability. In an era of increasing supply chain disruptions, market volatility, and global uncertainty, robust optimization represents a critical tool for resilient supply chain management.

The proposed model and methodology are implementation-ready and can be directly applied by practitioners using standard optimization software. As uncertainty continues to characterize modern business environments, the adoption of robust optimization approaches will become increasingly essential for competitive advantage and long-term sustainability.

مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط استوار برنامه ریزی تولید توزیع در

زنجیره تامین سه سطحی

کامی ساسانیان^۱، مهدی جلالی نسب^۲، اردشیر احمدی^۳، یر رادفر^۴، حسین رضایی^۵

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی صنایع بهینه سازی سیستم ها، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: taha.sasanian@gmail.com

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی صنایع بهینه سازی سیستم ها، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: m.jalalinasab@gmail.com

^۳ دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: ar.ahmady@eyc.ac.ir

^۴ دکتری مدیریت صنعتی-تولید عملیات- دانشگاه آزاد واحد رودهن- تهران، ایران. رایانامه: a.radfar@gmail.com

^۵ کارشناس ارشد مدیریت صنعتی- تولید عملیات- دانشگاه آزاد واحد تهران شمال- تهران، ایران. رایانامه: h.rezaei@gmail.com

چکیده

این پژوهش یک مدل بهینه سازی استوار برای برنامه ریزی یکپارچه تولید-توزیع در شبکه زنجیره تامین سه سطحی متشکل از تامین کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع کنندگان ارائه می نماید. با به کارگیری رویکرد بهینه سازی استوار بر تئیماس سیم، عدم قطعیت های موجود در تقاضا و هزینه های حمل و نقل در چهار روش حمل و نقل (جاده های، ریلی، دریایی و هوایی) مدیریت می گردد تا سود خالص حداکثر شود. مدل برنامه ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط پیشنهادی با استفاده از نرم افزار بهینه سازی GAMS/BARON نسخه ۶/۱۲ برای چهار سطح عدم قطعیت $(\rho = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0)$ در پنج سناریوی تولید شده تصادفی حل شده است. تحلیل مقایسه ای مدل های قطعی و استوار حاکی از آن است که مدل استوار موجب کاهش ۶۲ تا ۶۵ درصدی انحراف استاندارد می شود، در حالی که تنها ۷۵/۰ تا ۷۹/۱ درصد کاهش در میانگین سود را به همراه دارد. یافته ها نشان می دهد که مدل استوار از نسبت ریسک به بازده برتری برخوردار بوده و ضریب تغییرات را در تمامی سطوح عدم قطعیت بیش از ۶۰ درصد بهبود می بخشد، که این امر آن را برای محیط های کسب و کار با عدم قطعیت بالا بسیار کارآمد می سازد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

کلیدواژه ها:

بهینه سازی استوار عدم قطعیت

MINLP

بر تئیماس و سیم

زنجیره تامین چند سطحی

استناد: ساسانیان، کامی، جلالی نسب، مهدی، احمدی، اردشیر، رادفر، امیر، رضایی، حسین، "مدل برنامه ریزی غیرخطی اعداد صحیح

مختلط استوار برنامه ریزی تولید - توزیع در زنجیره تامین سه سطحی، دوره ۲۸، شماره ۲، صفحات ۳۷-۲۱، ۱۴۰۵.

DOI: <https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1675>

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

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

۱- مقدمه

برنامه ریزی تولید-توزیع یکپارچه در زنجیره تأمین از موضوعات مهم و چالش برانگیز در مدیریت زنجیره تأمین است. این نوع برنامه ریزی به دنبال هماهنگ سازی فعالیت های تولید و توزیع به منظور بهبود عملکرد کل زنجیره تأمین است. مطالعات نشان می دهند که یکپارچه سازی تصمیمات تولید و توزیع می تواند هزینه های عملیاتی را تا ۱۵-۲۵ درصد کاهش دهد. [۱]

با این حال، در دنیای واقعی، بسیاری از مولفه های مؤثر بر تصمیم گیری مانند تقاضا و هزینه های حمل و نقل دارای عدم قطعیت هستند. تحقیقات نشان می دهند که نادیده گرفتن عدم قطعیت ها می تواند منجر به زیان های مالی قابل توجه (۱۰ تا ۴۰ درصد افزایش هزینه) [۲] در عملیات زنجیره تأمین شود. رویکرد بهینه سازی استوار یکی از روش های مؤثر برای مقابله با عدم قطعیت در مسایل بهینه سازی است. این رویکرد به دنبال یافتن جواب هایی است که در برابر تغییرات مولفه های غیرقطعی مقاوم باشند. در این مقاله، یک مدل برنامه ریزی تولید-توزیع یکپارچه با رویکرد بهینه سازی استوار برای یک زنجیره تأمین سه سطحی شامل تولیدکنندگان، توزیع کنندگان و مصرف کنندگان ارائه می شود. هدف اصلی، بهینه سازی سود خالص زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و هزینه های حمل و نقل است.

۲- تعریف و بیان مساله

در دنیای واقعی کسب و کار، مدیریت زنجیره تأمین با چالش های متعددی از جمله عدم قطعیت در پارامترهای مختلف روبرو است. این عدم قطعیت ها می توانند ناشی از نوسانات تقاضا، تغییرات هزینه های حمل و نقل، تغییرات در زمان تحویل و سایر عوامل محیطی باشند. برنامه ریزی تولید و توزیع در چنین شرایطی نیازمند رویکردی است که بتواند در برابر این عدم قطعیت ها مقاوم باشد. مسئله مورد بررسی، یک زنجیره تأمین چند سطحی است که شامل تولیدکنندگان، توزیع کنندگان و مصرف کنندگان نهایی است. هدف اصلی، برنامه ریزی بهینه تولید و توزیع محصولات با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مولفه های کلیدی است. این پژوهش به بررسی یک شبکه زنجیره تأمین سه لایه ای می پردازد که در آن جریان کالا از طریق تولیدکنندگان متعدد، به شبکه ای از توزیع کنندگان و در نهایت به مصرف کنندگان نهایی می رسد. این ساختار امکان تولید و توزیع چندین نوع محصول را در بازه های زمانی مختلف فراهم می آورد.

۲-۱ ویژگی های کلیدی مسئله

- ۱- سیستم توزیع از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است: هر تولیدکننده قابلیت ارسال محصول به تمامی توزیع کنندگان را دارد
- ۲- هر توزیع کننده می تواند نیاز تمام مصرف کنندگان را برآورده سازد
- ۳- چهار شیوه حمل و نقل (جاده ای، ریلی، دریایی و هوایی) در دسترس است
- ۴- توزیع کنندگان فاقد انکار بلند مدت هستند و محصولات صرفاً برای دوره جاری نگهداری می شوند.
- ۵- هر مسیر حمل و نقل دارای ظرفیت مشخص است
- ۶- کمبود و تأخیر در تحویل مجاز نیست
- ۷- سطح نیروی کار ثابت است و تولید تنها در ساعات عادی انجام می شود
- ۸- در این سیستم، دو عنصر کلیدی تقاضای مصرف کنندگان و هزینه های حمل و نقل در مسیرهای مختلف با عدم قطعیت مواجه هستند. در هر دوره زمانی، یک روش حمل و نقل باید برای هر مسیر انتخاب شود. هدف بهینه سازی سود خالص است، به طوری که هزینه ها کاهش یابد و محدودیت ها ارضا شوند.

۳- ضرورت و اهمیت انجام پژوهش

ضرورت و اهمیت انجام پژوهش مدل سازی استوار برنامه ریزی تولید-توزیع در زنجیره تأمین با عدم قطعیت را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- ۱- مقابله با عدم قطعیت: در دنیای واقعی، بسیاری از مولفه های مؤثر بر تصمیم گیری در زنجیره تأمین مانند تقاضا و هزینه های حمل و نقل دارای عدم قطعیت هستند. مدل سازی استوار امکان در نظر گرفتن این عدم قطعیت ها را فراهم می کند.
- ۲- بهبود عملکرد زنجیره تأمین: برنامه ریزی یکپارچه تولید و توزیع به هماهنگ سازی فعالیت های تولید و توزیع منجر شده و عملکرد کل زنجیره تأمین را بهبود می بخشد.
- ۳- کاهش هزینه ها: هدف اصلی این مدل سازی، بهینه سازی سود با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها است که می تواند به کاهش قابل توجه هزینه ها منجر شود.
- ۴- تصمیم گیری بهینه در شرایط عدم قطعیت: مدل سازی استوار به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا در شرایط عدم قطعیت، تصمیمات بهینه و مقاوم اتخاذ کنند.

های خاص خود را دارد و انتخاب رویکرد مناسب بستگی به ماهیت مسئله دارد.

گابل و همکاران [۸] مروری بر پیشرفت های اخیر (۲۰۱۴-۲۰۰۷) در بهینه سازی استوار ارائه دادند و نشان دادند که تحقیقات به سمت بهینه سازی استوار توزیعی، ارتباط با نظریه ریسک و کاربردهای جدید در سامانه های انرژی دارد.

نقد: اکثر مطالعات مبانی نظری بر روی مسایل خطی متمرکز بوده اند و رویکرد Bertsimas-Sim به ندرت در مسایل غیرخطی چندهدفه زنجیره تأمین چند سطحی با حمل و نقل چندوجهی به کار رفته است.

۴-۲- برنامه ریزی یکپارچه تولید و توزیع

چن و همکاران [۹] با بررسی صنایع کامپیوتر و خدمات پذیرایی غذایی، یک مدل زمان بندی یکپارچه تولید و توزیع را مطالعه کردند که در آن سفارشات مشتری ابتدا در مرکز تولید پردازش و سپس بدون وجود واسطه به مشتریان تحویل داده می شوند. آنها نشان دادند که یکپارچه سازی تولید و توزیع می تواند نسبت به رویکرد توالی دار منافع قابل توجهی ایجاد کند.

سلیم و همکاران [۵] مسئله برنامه ریزی تولید-توزیع مشارکتی در زنجیره تأمین را با رویکرد برنامه ریزی هدف فازی مدل سازی کردند. آنها یک مدل برنامه ریزی خطی چندهدفه توسعه دادند و با آزمایش های محاسباتی بر روی ساختارهای متمرکز و غیرمتمرکز زنجیره تأمین نشان دادند که رویکردهای برنامه ریزی هدف فازی می توانند به طور مؤثر مسایل برنامه ریزی مشارکتی را مدیریت کنند. فهم نیا و همکاران [۱۰] مروری جامع و انتقادی بر مدل ها و روش های برنامه ریزی یکپارچه تولید-توزیع ارائه دادند. آنها مدل های منتشر شده را به هفت دسته بر اساس درجه پیچیدگی و قابلیت پرداختن به سناریوهای واقعی طبقه بندی نمودند و شکاف های موجود در ادبیات را شناسایی کردند. آنها نشان دادند که اکثر مطالعات به مدل های تک هدفه، قطعی و دوسطحی محدود شده اند. نقد: اکثر مطالعات برنامه ریزی یکپارچه، عدم قطعیت را نادیده گرفته اند یا فقط به عدم قطعیت تقاضا پرداخته اند، در حالی که هزینه های حمل و نقل نیز دارای نوسانات قابل توجهی هستند.

۴-۳- مدل های بهینه سازی استوار در زنجیره تأمین

آقذوف و همکاران [۱] مسئله مسیریابی موجودی در زنجیره تأمین محصولات با مصرف بالا را مدل سازی کردند. آنها مفهوم مسیره های چندگانه را معرفی و با استفاده از روش تولید ستون، مسئله را حل

۵- کاربردپذیری در صنعت: با توجه به افزایش پیچیدگی زنجیره های تأمین جهانی و نوسانات بازار، نیاز به مدل های قوی و کاربردی بیش از پیش احساس می شود. بنابراین، انجام این پژوهش می تواند به بهبود قابل توجه در برنامه ریزی و مدیریت زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت منجر شود.

۴-۴- مروری بر ادبیات نظری پژوهش

پژوهش های متعددی درباره برنامه ریزی تولید و توزیع با رویکرد بهینه سازی استوار صورت گرفته است. در این بخش به مروری بر مهم ترین مطالعات انجام شده می پردازیم.

۴-۱- مبانی نظری بهینه سازی استوار

بهینه سازی استوار رویکردی است که به دنبال یافتن جواب هایی است که در برابر تغییرات پارامترهای غیرقطعی مقاوم باشند. سوپر و همکاران [۶] نخستین چارچوب بهینه سازی استوار را با رویکرد محافظه کارانه ارائه دادند که در آن تمامی پارامترها در بدترین حالت خود قرار می گیرند. این رویکرد اگرچه امنیت بالایی فراهم می کرد، اما به دلیل محافظه کاری بیش از حد، جواب های بسیار گران قیمت تولید می نمود.

بنتال و همکاران [۷] با معرفی مجموعه های عدم قطعیت بیضوی، رویکردی کمتر محافظه کارانه ارائه دادند و نشان دادند که مسایل برنامه ریزی خطی، مخروطی و نیمه معین استوار قابل حل کارا هستند. آنها کاربردهای واقعی از جمله طراحی آنتن، توپولوژی خرپا و تحلیل پایداری سیستم های دینامیکی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که جواب های معمولی مسایل LP در برابر اختلالات کوچک داده ها آسیب پذیر هستند.

برتیماس و سیم [۲] با معرفی مفهوم "قیمت استواری"، چارچوبی نوآورانه ارائه دادند که با تعریف مجموعه عدم قطعیت بودجه ای، امکان کنترل انعطاف پذیر سطح محافظه کاری را فراهم می سازد. مزیت کلیدی این رویکرد، حفظ خطی بودن مدل و قابلیت تعمیم آسان به مسایل گسسته است. آنها با آزمایش عددی بر روی مسایل بهینه سازی پرتفوی، کوله پشتی، نشان دادند که این رویکرد می تواند تعادل مناسبی بین هزینه و استواری ایجاد کند.

سahیندیس [۱۲] مروری جامع بر بهینه سازی تحت عدم قطعیت ارائه داد و رویکردهای مختلف از جمله برنامه ریزی تصادفی بازگشتی، برنامه ریزی استوار تصادفی، برنامه ریزی احتمالاتی (محدودیت های شانس)، برنامه ریزی فازی و برنامه ریزی پویای تصادفی را مقایسه نمود. او نشان داد که هر رویکرد مزایا و محدودیت

گیتی نورد و همکاران [۱۸] با هدف پر کردن شکاف ساختار هزینه و هدررفت در زنجیره تأمین سرد، یک مدل ریاضی دو فاز و استوار برای مسئله مکان یابی-مسیریابی هاب تحت تقاضای نامعین ارایه داده اند. نوآوری این کار در ترکیب رویکرد امکان سنجی استوار با روش اپسیلون-محدودیت تعمیم یافته برای کمینه سازی هم زمان هزینه ها و نرخ پس افت مشتریان کلیدی است. اعتبارسنجی تجربی این مدل بهبود چشمگیری را در شاخص های کلیدی عملکرد، از جمله کاهش هزینه های کل و نرخ فساد کالاهای فاسدشدنی، به تصویر می کشد.

وانگ و همکاران [۱۹] با هدف بهبود پایداری در زنجیره های تأمین چنددوره ای و چندمحصولی، یک مدل ریاضی چندهدفه تحت عدم قطعیت فازی توسعه داده است. در این راستا، نویسندگان روش فرمول بندی جدیدی را برای قطعی سازی متغیرهای دارای پارامتر فازی ارایه کرده و از رویکرد چانه زنی نش برای اتخاذ استراتژی های عادلانه میان اهداف هزینه و زنجیره تأمین استفاده نموده اند. ارزیابی مدل از طریق شبیه سازی مونت کارلو، کارآمدی و عادلانه تر بودن تصمیمات بهینه حاصل را در سطوح مختلف عدم قطعیت تأیید می کند.

نقد: اکثر مطالعات فقط یک یا دو نوع عدم قطعیت را در نظر گرفته اند و تعداد محدودی از آنها، عدم قطعیت همزمان در تقاضا و هزینه های حمل و نقل با چندین شیوه حمل و نقل را مدل سازی کرده اند.

۴-۴- مطالعات داخلی مرتبط

مظفری و سبحانی منش یک مدل چندهدفه مکانی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پلاکت با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و تعداد اهداکنندگان ارایه دادند. این مدل برنامه ریزی چنددوره ای برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط بوده است که با CPLEX حل شده است. این مطالعه نشان داد که مدل سازی عدم قطعیت می تواند به تصمیم گیری بهتر در زنجیره تأمین بهداشتی کمک کند.

امیریان و همکاران [۱۴] یک مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان چندمحصولی و چنددوره ای با سه هدف سودآوری، مسئولیت پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان تحت عدم قطعیت در صنعت کارتن ارایه دادند. آنها از اعداد فازی مثلثی و رویکرد برنامه ریزی امکانی استوار استفاده و مدل را با روش AEC و نرم افزار GAMS/CPLEX حل نمودند.

حسن پور و همکاران [۱۵] رویکردها، فرآیند شکل گیری، مزایا، عیوب و موانع پیاده سازی حمل و نقل چندوجهی را به ویژه در محیط

نمودند. این مطالعه نشان داد که استفاده از مسیر های چند گانه می تواند هزینه های ناوگان و موجودی راکاهش دهد.

میرزاپور و همکاران [۳] یک مدل بهینه سازی استوار چند هدفه برنامه ریزی تولید جمعی برای زنجیره تأمین چند محصولی، چند سایتی تحت عدم قطعیت ارایه دادند. آنها دو هدف حداقل سازی هزینه های زنجیره تأمین و حداقل سازی کمبود برای افزایش رضایت مشتری را همزمان در نظر گرفتند و مدل را با روش LP-metrics حل نمودند. نتایج مطالعه موردی صنعتی نشان داد که مدل پیشنهادی می تواند رویکردی امیدوارکننده برای برنامه ریزی کارآمد در زنجیره تأمین فراهم نماید.

پیشوایی و همکاران [۴] رویکرد نوینی به نام برنامه ریزی امکانی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با مسئولیت اجتماعی تحت شرایط عدم قطعیت ارایه دادند. آنها یک مدل برنامه ریزی ریاضی دوهدفه حداقل سازی هزینه کل و حداکثرسازی مسئولیت اجتماعی توسعه دادند و انواع مختلف مدل های برنامه ریزی مکانی استوار را با بحث درباره تفاوت ها، نقاط ضعف، نقاط قوت و مناسب ترین شرایط استفاده مقایسه نمودند.

پدرو و همکاران [۱۱] مروری بر مدل های کمی برنامه ریزی زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت انجام دادند و ۱۰۳ مرجع از سال های ۱۹۸۸-۲۰۰۷ را طبقه بندی نمودند. آنها نشان دادند که روش های برنامه ریزی که عدم قطعیت را شامل نمی شوند، نتایج ضعیف تری نسبت به مدل هایی که عدم قطعیت را به صورت صریح مدل سازی می کنند، دارند.

با توجه به اهمیت امنیت غذایی در زمان بحران، خمسه و همکاران [۱۶] زنجیره تأمین محصولات غذایی کنسروی را تحت شرایط عدم قطعیت کووید-۱۹ مدل سازی کردند. پژوهش آن ها با استفاده از بهینه سازی استوار ثابت کرد که پیاده سازی راهبردهای توسعه صادرات به کشورهای همسایه در زمان بحران می تواند تا ۸ درصد هزینه های کل سیستم لجستیک را کاهش داده و ظرفیت های حمل و نقل و تولید را به ترتیب تا ۹۶ و ۷۵ درصد فعال نگه دارد.

بوهمیک و همکاران [۱۷] با طراحی یک مدل ریاضی برای لجستیک یک شرکت چند ملیتی پوشاک و تجهیزات ورزشی، اثر عدم قطعیت تقاضا را بر هزینه های شبکه بررسی کردند. آن ها با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو و تحلیل حساسیت نشان دادند که بهینه سازی توام مکان یابی تسهیلات و جریان کالاها، پایداری زنجیره را افزایش داده و هزینه های کل سامانه را تا ۳ درصد بهبود می بخشد.

این ویژگی ها باعث می شود مدل پیشنهادی به واقعیت نزدیک تر بوده و جواب های عملی تر ارائه دهد.

۵- روش شناسی پژوهش

از آنجا که پژوهش حاضر به دنبال بهبود مدل های گذشته و ارائه مدل کاربردی و عملیاتی است، هدف گرا و در گروه پژوهش های کاربردی-توسعه ای قرار می گیرد. از نظر ماهیت نیز کمی و ریاضی است و از لحاظ گردآوری داده ها از نوع گردآوری داده های ثانویه می باشد. با در نظر گرفتن یک زنجیره تأمین سه سطحی، شامل دو تولیدکننده، دو توزیع کننده و دو مصرف کننده، برنامه ریزی تولید و توزیع را برای دو نوع محصول مختلف برای یک بازه زمانی سه ماهه در نظر می گیریم. در ابتدا مدل قطعی و سپس مدل استوار برای چهار سطح عدم قطعیت ۱، ۰.۷، ۰.۳، ۰ حل می شوند و میانگین و انحراف معیار مقدار تابع هدف بدست آمده هر دو مدل برای پنج سناریو در چهار سطح عدم قطعیت مورد ارزیابی قرار می گیرد.

هر دو مدل توسط نرم افزار بهینه سازی GAMS/BARON12.6 حل شده که در این نرم افزار از الگوریتم شاخه-کران و دوگان مسئله مورد نظر استفاده می شود.

قلمرو موضوعی: چگونگی روش مدل سازی استوار برنامه ریزی تولید - توزیع در زنجیره تأمین با عدم قطعیت
قلمرو سازمانی: انواع تولیدکنندگان و توزیع کنندگان
قلمرو زمانی: سال ۱۴۰۴ شمسی

۵-۱- تشریح مساله و مدل سازی

مسئله مورد بررسی دارای ویژگی های زیر است:

۵-۱-۱- شامل چندین تولیدکننده، توزیع کننده و مصرف کننده است.

۵-۱-۲- چند محصولی و چند دوره ای است.

۵-۱-۳- هر تولیدکننده می تواند همه توزیع کنندگان را پشتیبانی نماید.

۵-۱-۴- هر توزیع کننده می تواند همه مصرف کنندگان را تأمین نماید.

۵-۱-۵- چهار حالت حمل و نقل (جاده ای، دریایی و هوایی) با ظرفیت مشخص در نظر گرفته شده است.

های نظامی بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که حمل و نقل چندوجهی می تواند هزینه ها را کاهش و قابلیت اطمینان را افزایش دهد، اما نیازمند هماهنگی بالا و زیرساخت مناسب می باشد.

نقد: مطالعات داخلی عمدتاً بر روی صنایع خاص متمرکز بوده اند و تعداد محدودی از آنها، رویکرد Bertsimas-Sim را در مسایل غیرخطی به کار برده اند.

۴-۵- شکاف های تحقیقاتی و نوآوری پژوهش حاضر

با مرور جامع ادبیات، شکاف های زیر شناسایی شده اند:

عدم قطعیت محدود: اکثر مطالعات فقط عدم قطعیت تقاضا را در نظر گرفته اند [۱] [۳] [۱۳]، در حالی که هزینه های حمل و نقل نیز به دلیل نوسانات قیمت سوخت و نرخ ارز دارای عدم قطعیت قابل توجه هستند.

حمل و نقل چندوجهی محدود: تعداد بسیار کمی از مطالعات، چهار شیوه حمل و نقل (جاده ای، ریلی، دریایی و هوایی) را همزمان مدل سازی کرده اند [۱۵] و اکثر مطالعات به یک یا دو شیوه محدود شده اند.

کاربرد محدود رویکرد بر تیماس سیم: این رویکرد اغلب در مسایل خطی استفاده شده است و کاربرد آن در مسایل غیرخطی اعداد صحیح مختلط زنجیره تأمین چندسطحی محدود است. **یکپارچگی ناقص:** اکثر مطالعات یا بر تولید یا بر توزیع تمرکز داشته اند [۹] [۱۰] مدل های یکپارچه با حمل و نقل چندوجهی و عدم قطعیت همزمان نادر هستند.

نوآوری پژوهش حاضر:

پژوهش حاضر با ارائه یک مدل MINLP استوار برای برنامه ریزی یکپارچه تولید - توزیع در زنجیره تأمین سه سطحی با ویژگی های زیر، شکاف های بیان شده را پوشش می دهد:

عدم قطعیت دوگانه: در نظر گرفتن همزمان عدم قطعیت در تقاضا و هزینه های حمل و نقل

حمل و نقل چندوجهی کامل: مدل سازی چهار شیوه حمل و نقل با انتخاب بهینه برای هر مسیر در هر دوره

رویکرد Bertsimas-Sim در MINLP: کاربرد رویکرد بودجه عدم قطعیت در مسئله غیرخطی چندهدفه

یکپارچگی کامل: هماهنگی همزمان تصمیمات تولید، موجودی، توزیع و انتخاب حالت حمل و نقل

۵-۲ - مفروضات اصلی مسئله عبارتند از:

۵-۲-۱- تقاضا و هزینه های حمل و نقل غیرقطعی هستند: نوسانات بازار و تغییرات قیمت سوخت و نرخ ارز موجب عدم قطعیت این پارامترها می شود.

۵-۲-۲- کمبود و تأخیر مجاز نیست: در صنایعی با قراردادهای قطعی (نظامی، دارویی، خودروسازی)، عدم تحویل به موقع مستلزم جریمه های سنگین است، لذا مدل تأمین کامل را هدف قرار می دهد.

۵-۲-۳- سطح نیروی انسانی ثابت و تولید فقط در وقت عادی انجام می شود: در برنامه ریزی تاکتیکی با دوره های کوتاه، تغییر سریع نیروی کار به دلیل محدودیت های قانونی و هزینه های استخدام/ اخراج امکان پذیر نیست.

۵-۲-۴- زمان تحویل ناچیز است: در برنامه ریزی با دوره های ماهانه/ فصلی، زمان تحویل ۱۱ الی ۳ روزه نسبت به طول دوره ۳۰ الی ۹۰ روزه قابل چشم پوشی است.

۵-۲-۵- در هر دوره باید یک حالت حمل و نقل برای هر مسیر انتخاب شود: این فرض منعکس کننده واقعیت عملیاتی است؛ زیرا مدیریت همزمان چند شیوه حمل و نقل برای یک مسیر پیچیدگی های قراردادی و لجستیکی قابل توجهی دارد.

۵-۲-۶- توزیع کنندگان، انبار نگهداری بلندمدت محصول ندارند و محصولات فقط برای همان دوره فعلی ذخیره می شوند: بسیاری از توزیع کنندگان به دلیل محدودیت فضا، هزینه بالای نگهداری و خطر منسوخ شدن، از سیاست cross-docking استفاده می کنند.

۵-۳ - مدل سازی اولیه

در این بخش ابتدا نمادگذاری پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی و سپس مدل اولیه مسئله ارایه می گردد. در این بخش ابتدا نمادگذاری پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی و سپس مدل اولیه مسئله ارائه میشود.

۵-۳-۱- متغیرها و پارامترهای مدل پیشنهادی:

مجموعه تولیدکننده گان $I = \{1, 2, 3, \dots, n_I\}$

مجموعه توزیع کننده گان $J = \{1, 2, 3, \dots, n_J\}$

مجموعه مصرف کننده گان $K = \{1, 2, 3, \dots, n_K\}$

مجموعه محصولات $P = \{1, 2, 3, \dots, n_P\}$

مجموعه دوره های زمانی $T = \{1, 2, 3, \dots, n_T\}$

مجموعه حالت های حمل و نقل: $M = \{1, 2, 3, 4\}$

جایی که:

$M=1$ حمل و نقل جاده ای

$M=2$ حمل و نقل ریلی

$M=3$ حمل و نقل دریایی

$M=4$ حمل و نقل هوایی

پارامترهای مساله:

Cap_i : ظرفیت تولیدکننده i ام

DC_j : ظرفیت توزیع کننده j ام برای نگهداری محصولات

SC_i : هزینه ثابت آماده سازی برای تولیدکننده i ام در هر دوره

PC_{ipt} : هزینه تولید هر واحد محصول p ام برای تولید کننده i ام در دوره t ام

HC_{jp} : هزینه نگهداری هر واحد محصول p ام برای توزیع کننده j ام

S_{kpt} : قیمت فروش هر واحد محصول p ام به مصرف کننده k ام در دوره t ام

TMC_m : ظرفیت توزیع محصولات در حالت حمل و نقل m

D_{KPT} : تقاضای قطعی مصرف کننده k ام برای محصول p در دوره t ام

$\overline{TC1}_{ijpm}$: مقدار اسمی هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p

ام از تولیدکننده i ام به توزیع کننده j ام در حالت m

$\overline{TC2}_{jkpm}$: مقدار اسمی هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p

ام از توزیع کننده j ام به مصرف کننده k ام در حالت m

پارامترهای غیر قطعی:

$\tilde{D}_{KPT}$: تقاضای غیر قطعی مصرف کننده k ام برای محصول p در دوره t ام

$\overline{TC1}_{ijpm}$: هزینه حمل و نقل غیر قطعی هر واحد محصول p ام

از تولیدکننده i ام به توزیع کننده j ام در حالت m

$\overline{TC2}_{jkpm}$: هزینه حمل و نقل غیر قطعی هر واحد محصول p

ام از توزیع کننده j ام به مصرف کننده k ام در حالت m

متغیرهای مساله:

Y_{jkpt} : میزان محصول توزیع شده p ام از توزیع کننده j ام به

مصرف کننده k ام در دوره t ام

X_{ijpt} : میزان محصول توزیع شده p ام از تولیدکننده i ام به

توزیع کننده j ام در دوره t ام

Q_{ipt} : میزان محصول p ام تولیدشده توسط تولیدکننده i ام در دوره t ام

$$I_{jp(t-1)} + \sum_{i \in J} X_{ijpt} = I_{jpt} + \sum_{k \in K} Y_{jkpt} \quad \forall p$$

$$\in P,$$

$$j \in J, t \in T(5)$$

$$I_{jp0} \text{ با فرض}$$

$$F_{kpt} = \sum_{j \in J} Y_{jkpt} \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P$$

$$(6)$$

$$F_{kpt} \geq D_{KPt} \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{m \in M} Z_{ijptm} = 1 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, t$$

$$\in T \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} W_{jkptm} = 1 \quad \forall k \in K, j \in J, p \in P, t$$

$$\in T \quad (9)$$

$$X_{ijpt} \leq TMC_m Z_{ijptm}$$

$$\forall i \in I, j \in J, p \in P, t \in T, m$$

$$\in M \quad (10)$$

$$Y_{jkpt} \leq TMC_m W_{jkptm}$$

$$\forall k \in K, j \in J, p \in P, t \in T, m$$

$$\in M \quad (11)$$

$$F_{kpt}, X_{ijpt}, Y_{jkpt}, D_{KPt}, I_{jpt} \geq 0$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, t$$

$$\in T \quad (12)$$

$$Z_{ijptm}, W_{jkptm}, \delta_{it} \in \{0,1\}$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, t \in T, m \in M \quad (13)$$

مدل فوق یک مسئله برنامه ریزی تولید و توزیع چند محصولی در یک زنجیره تأمین سه سطحی (تولیدکننده، توزیع کننده و مصرف کننده) است. که بیشینه سازی سود خالص شامل درآمد فروش منهای کل هزینه ها (هزینه نگهداری موجودی، هزینه ثابت آماده سازی، هزینه تولید، هزینه حمل و نقل) می باشد. محدودیت دوم ظرفیت تولید برای هر تولیدکننده را تضمین می کند. محدودیت سوم تعادل تولید و توزیع برای هر تولیدکننده را تضمین می کند (تمامی محصولات تولید شده به توزیع کنندگان ارسال می شود). محدودیت چهارم ظرفیت نگهداری توزیع کننده را محدود می کند و محدودیت پنجم تعادل موجودی در توزیع کنندگان را برقرار می کند.

محدودیت ششم نشان می دهد که کل محصولات فروخته شده برابر با کل محصولات توزیع شده است. محدودیت هفتم برآورده کردن تقاضا را تضمین می کند. محدودیت های هشتم و نهم انتخاب دقیقاً یک حالت حمل و نقل برای هر مسیر را الزامی

F_{kpt} : میزان محصول p ام فروخته شده به مصرف کننده k ام در دوره t ام

I_{jpt} : موجودی محصول p ام توسط توزیع کننده j ام در دوره t ام

Z_{ijptm} : متغیر صفر و یک، اگر برای توزیع محصول p ام از تولیدکننده i ام به توزیع کننده j ام در دوره t ام، حالت حمل و نقل m ام انتخاب شود برابر یک و در غیر این صورت برابر با صفر می باشد.

W_{jkptm} : متغیر صفر و یک، اگر برای توزیع محصول p ام از توزیع کننده j ام به مصرف کننده k ام در دوره t ام، حالت حمل و نقل m ام انتخاب شود برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر می باشد.

δ_{it} : اگر تولیدکننده i در دوره t فعال باشد (تولید داشته باشد) برابر یک و در غیر این صورت برابر با صفر می باشد. این متغیر برای محاسبه هزینه ثابت آماده سازی استفاده می شود.

مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط مسئله تولید - توزیع چند محصولی برای T دوره برنامه ریزی و در حالت قطعی به صورت زیر است:

$$\max Z = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T S_{kpt} F_{kpt}$$

$$- \left(\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T SC_i \delta_{it} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T PC_{ipt} Q_{ipt} \right.$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^4 TC1_{ijpm} X_{ijpt} Z_{ijptm}$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T HC_{jpt} I_{jpt}$$

$$\left. + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^4 TC2_{jkpm} Y_{jkpt} W_{jkptm} \right) \quad (1)$$

$$\sum_{p \in P} Q_{ipt} \leq cap_i \delta_{it} \quad \forall i \in I, t \in T(2)$$

$$Q_{ipt} = \sum_{j \in J} X_{ijpt} \quad \forall i \in I, t \in T, p \in P(3)$$

$$\sum_{p \in P} I_{jpt} \leq DC_j \quad \forall j \in J, t \in T$$

$$(4)$$

می‌کنند. محدودیت های دهم و یازدهم ظرفیت حمل و نقل را برای هر حالت تضمین می‌کنند. محدودیت های دوازدهم و سیزدهم قیود علامت و نوع متغیرها را مشخص می‌کنند.

۵-۳-۲- مدل بهینه سازی استوار

همان گونه که بیان شد، هدف از تحلیل مسئله، بهینه سازی سود (طبق رابطه ۱) با کاهش هزینه ها است، به طوری که محدودیت ها (روابط ۲ تا ۱۳) ارضا شوند. با توجه به اینکه تقاضای مصرف کنندگان و همچنین هزینه های مربوط به حالت های حمل و نقل غیرقطعی است و تابع توزیع احتمالی این پارامترها وجود ندارد، رویکرد بهینه سازی استوار برای دستیابی به هدف بالا استفاده می شود.

رویکرد Bertsimas-Sim برای بهینه سازی استوار:

برای ایجاد مدل بهینه سازی استوار، فرض می شود که پارامترهای غیرقطعی در یک مجموعه عدم قطعیت متغیر هستند. مدل بهینه سازی غیرقطعی کلی زیر را در نظر بگیرید:

$$\max C^T X \quad (14)$$

$$x + By \leq d \quad x \geq 0, y \in [0,1] \text{ s.t.}$$

در رابطه فوق بردارهای c, d به ترتیب نشان دهنده ضرایب هزینه و پارامترهای سمت راست می باشند و ماتریس های A, B ماتریس ضرایب فنی محدودیت ها را نشان می دهند. بردار y نمایانگر همه متغیرهای باینری و بردار x نمایانگر همه متغیرهای تصمیم پیوسته می باشد. همان گونه که بیان گردید، پارامترهای تقاضا و هزینه های حمل و نقل غیرقطعی بوده و تابع توزیع احتمال آنها نیز نامشخص می باشد. برای پارامترهای غیرقطعی، مقدار اسمی و انحراف آنها به صورت زیر تعریف می شود که برای تقاضا داریم:

$$\bar{D}_{kpt} = \bar{D}_{kpt} + \bar{D}_{kpt} \xi_{kpt}^d \quad (15)$$

جایی که:

$\bar{D}_{kpt}$: مقدار واقعی (تحقق یافته) تقاضا تحت عدم قطعیت

$\bar{D}_{kpt}$: مقدار اسمی تقاضا

$\bar{D}_{kpt}$: حداکثر انحراف (نوسان) ممکن تقاضا از مقدار اسمی که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{D}_{kpt} = \rho_d \bar{D}_{kpt} \quad \text{که در آن } \rho_d \text{ ضریب انحراف بوده و سطح}$$

عدم قطعیت را بیان و کنترل می کند.

$$\bar{TC1}_{ijpm} = TC1_{ijpm} + \hat{TC1}_{ijpm} \xi_{ijpm}^{tc1}$$

$$\bar{TC2}_{jkpm} = TC2_{jkpm} + \hat{TC2}_{jkpm} \xi_{jkpm}^{tc2}$$

$$\hat{TC1}_{ijpm} = \rho_{rp} TC1_{ijpm}$$

$$\hat{TC2}_{jkpm} = \rho_{rd} TC2_{jkpm}$$

$$\xi_{jkpm}^{tc2}, \xi_{ijpm}^{tc1} \sim \text{uniform}(-1,1)$$

مجموعه عدم قطعیت بودجه ای Bertsimas-Sim:

$$u_d = \left\{ \xi^d : \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} |\xi_{kpt}^d| \leq \Gamma_d, |\xi_{kpt}^d| \leq 1 \right\}$$

$$u_{tc1} = \left\{ \xi^{tc1} : \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} |\xi_{ijpm}^{tc1}| \leq \Gamma_{tc1}, |\xi_{ijpm}^{tc1}| \leq 1 \right\}$$

$$u_{tc2} = \left\{ \xi^{tc2} : \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} |\xi_{jkpm}^{tc2}| \leq \Gamma_{tc2}, |\xi_{jkpm}^{tc2}| \leq 1 \right\}$$

جایی که Γ_d, Γ_{tc1} و Γ_{tc2} پارامترهای بودجه عدم قطعیت هستند که سطح محافظه کاری مدل را کنترل می کنند.

$$0 \leq \Gamma_d \leq |S_D|$$

$$0 \leq \Gamma_{tc1} \leq |S_{TC1}|$$

$$0 \leq \Gamma_{tc2} \leq |S_{TC2}|$$

در رویکرد Bertsimas-Sim، برای کنترل سطح محافظه کاری مدل استوار، از مفهوم بودجه عدم قطعیت (Uncertainty Budget) با نماد Γ استفاده می شود. این پارامتر حداکثر تعداد پارامترهایی که می توانند به طور همزمان در بدترین حالت خود قرار گیرند را محدود می کند. برای تعیین محدوده مجاز Γ ، ابتدا تعداد کل پارامترهای غیرقطعی در هر دسته محاسبه می شود که تفسیر سطوح مختلف بودجه عدم قطعیت (Γ) در مدل استوار در جدول شماره یک نشان داده شده است.

$|S|$ تعداد کل پارامترهای غیر قطعی می باشد.

$$|S| = |S_D| + |S_{TC1}| + |S_{TC2}|$$

تعداد کل نقاط تقاضای غیر قطعی

$$|S_D| = |K| \times |P| \times |T|$$

تعداد کل مسیرهای تولید توزیع

$$|S_{TC1}| = |I| \times |J| \times |P| \times |M|$$

تعداد کل مسیرهای توزیع مصرف

$$|S_{TC2}| = |J| \times |K| \times |P| \times |M|$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \xi_{kpt}^d \leq \Gamma_d \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \xi_{ijpm}^{tc1} \leq \Gamma_{tc1} \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \xi_{jkpm}^{tc2} \leq \Gamma_{tc2} \quad (29)$$

$$0 \leq \xi_{kpt}^d, \xi_{ijpm}^{tc1}, \xi_{jkpm}^{tc2} \leq 1 \quad (30)$$

$$F_{kpt}, X_{ijpt}, Y_{jkpt}, D_{KPt}, I_{jpt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, \\ p \in P, t \in T \quad (31)$$

$$Z_{ijptm}, W_{jkptm}, \delta_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, \\ p \in P, t \in T, m \in M \quad (32)$$

محدودیت ۱۷ ام ظرفیت تولید برای هر تولیدکننده را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۸ ام تعادل تولید و توزیع برای هر تولیدکننده را تضمین می‌کند (تمامی محصولات تولیدشده به توزیع کنندگان ارسال می‌شود). محدودیت ۱۹ ام ظرفیت نگهداری توزیع کننده را محدود می‌کند و محدودیت ۲۰ ام تعادل موجودی در توزیع کنندگان را برقرار می‌کند. محدودیت ۲۱ ام نشان می‌دهد که کل محصولات فروخته‌شده برابر با کل محصولات توزیع‌شده است. محدودیت ۲۲ ام برآورده کردن تقاضای استوار را تضمین می‌کند. محدودیت های ۲۳ ام و ۲۴ ام انتخاب دقیقاً یک حالت حمل‌ونقل برای هر مسیر را الزامی می‌کنند. محدودیت های ۲۵ ام و ۲۶ ام ظرفیت حمل‌ونقل را برای هر حالت تضمین می‌کنند. محدودیت های ۲۷ ام تا ۲۹ ام محدودیت های بودجه عدم قطعیت می باشند.

۶- نتایج حاصل از پژوهش

در این بخش به بررسی عملکرد مدل‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود. با در نظر گرفتن یک زنجیره تأمین سه سطحی، شامل دو تولیدکننده، دو توزیع کننده و دو مصرف کننده، برنامه ریزی تولید و توزیع را برای دو نوع محصول مختلف در یک بازه زمانی سه ماهه در نظر گرفته می‌شود. مقادیر پارامترهای قطعی مسئله در جدول (۴) ارائه شده است. برای پارامترهای غیرقطعی (تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل)، ابتدا مقادیر اسمی $\bar{D}_{kpt}$ ، $\bar{T}\bar{C}1_{ijpm}$ ، $\bar{T}\bar{C}2_{jkpm}$ به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت در محدوده‌های زیر انتخاب می‌شوند:

$$\bar{T}\bar{C}1_{ijpm} \sim \text{uniform}(3,10)$$

مقدار اسمی هزینه حمل و نقل از تولید کننده به توزیع کننده

$$\bar{T}\bar{C}2_{jkpm} \sim \text{uniform}(2,8)$$

مقدار اسمی هزینه حمل و نقل از توزیع کننده به مصرف کننده

$$\bar{D}_{kpt} \sim \text{uniform}(20,150)$$

مقدار اسمی تقاضای هر مصرف کننده برای هر محصول چهار سطح

عدم قطعیت برای پارامتر های غیر قطعی مطابق اطلاعات جدول (۲) در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): تفسیر سطوح مختلف بودجه عدم قطعیت (Γ) در مدل استوار

معنی	سطح محافظه کاری	تعداد پارامترهای منحرف	مقدار Γ
همه پارامترها مقدار اسمی دارند	صفر (مدل قطعی)	هیچ کدام	$\Gamma = 0$
فقط Γ پارامتر بدترین حالت	جزئی (واقع بینانه)	برخی	$0 < \Gamma < S $
همه پارامترها بدترین حالت	کامل (بدبینانه)	همه	$\Gamma = S $

حال با استفاده از رویکرد Bertsimas-Sim، مدل استوار به صورت زیر فرمول بندی می‌شود

$$\max Z =$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T S_{kpt} F_{kpt} - \left(\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T SC_i \delta_{it} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T PC_{ipt} Q_{ipt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M (T\bar{C}1_{ijpm} + T\bar{C}1_{ijpm} \xi_{ijpm}^{tc1}) X_{ijpt} Z_{ijptm} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T HC_{jp} I_{jpt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (T\bar{C}2_{jkpm} + T\bar{C}2_{jkpm} \xi_{jkpm}^{tc2}) Y_{jkpt} W_{jkptm} \right) \quad (16)$$

$$\sum_{p \in P} Q_{ipt} \leq cap_i \delta_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (17)$$

$$Q_{ipt} = \sum_{j \in J} X_{ijpt} \quad \forall i \in I, t \in T, p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} I_{jpt} \leq DC_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (19)$$

$$I_{jp(t-1)} + \sum_{i \in I} X_{ijpt} = I_{jpt} + \sum_{k \in K} Y_{jkpt} \quad \forall p \in P, j \in J, t \in T \quad (20)$$

$$I_{jp0} = 0 \text{ با فرض}$$

$$F_{kpt} = \sum_{j \in J} Y_{jkpt} \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P \quad (21)$$

$$F_{kpt} \geq D_{KPt} + \bar{D}_{kpt} \xi_{kpt}^d \quad \forall k \in K, t \in T, p \in P \quad (22)$$

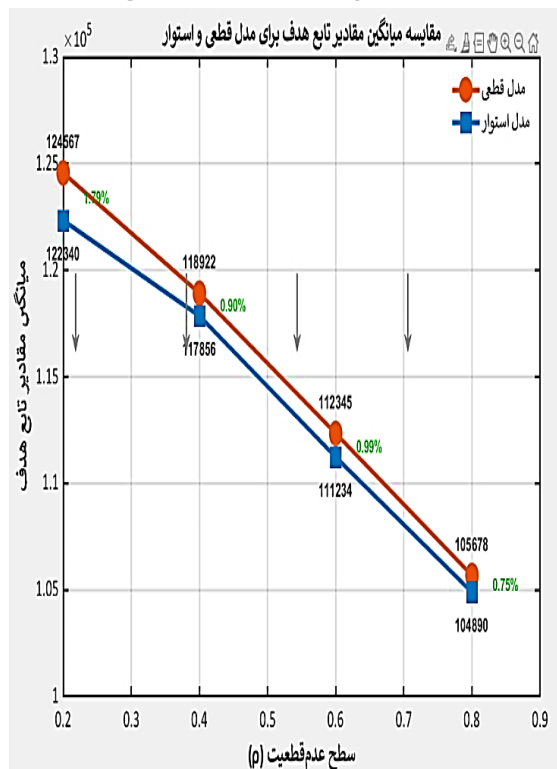
$$\sum_{m \in M} Z_{ijptm} = 1 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{m \in M} W_{jkptm} = 1 \quad \forall k \in K, j \in J, p \in P, t \in T \quad (24)$$

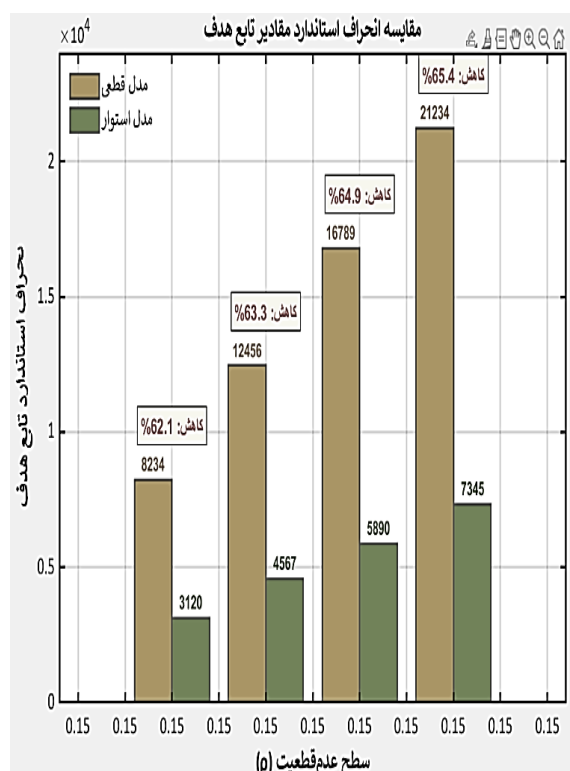
$$X_{ijpt} \leq TMC_m Z_{ijptm} \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, t \in T, m \in M \quad (25)$$

$$Y_{jkpt} \leq TMC_m W_{jkptm} \quad \forall k \in K, j \in J, p \in P, t \in T, m \in M \quad (26)$$

در شکل (۱) مقایسه میانگین مقادیر تابع هدف برای مدل قطعی و استوار نشان داده شده است و شکل (۲) نیز بیانگر مقایسه انحراف استاندارد های مقادیر تابع هدف برای هر دو مدل می باشد.



شکل (۱): مقایسه میانگین توابع هدف مدل قطعی و استوار



شکل (۲): مقایسه انحراف استاندارد توابع هدف مدل قطعی و

جدول (۲): سطح عدم قطعیت

سطح عدم قطعیت	توضیحات	بازه اندازه گیری
ρ_d	سطح عدم قطعیت برای تقاضای هر مصرف کننده برای هر محصول در هر دوره	۰.۲ ۰.۴ ۰.۶ ۰.۸
ρ_{rp}	سطح عدم قطعیت برای هزینه حمل و نقل از تولید کننده به توزیع کننده	۰.۲ ۰.۴ ۰.۶ ۰.۸
ρ_{rd}	سطح عدم قطعیت برای هزینه حمل و نقل از توزیع کننده به مصرف کننده	۰.۲ ۰.۴ ۰.۶ ۰.۸

برای هر سطح عدم قطعیت، مدل قطعی و مدل استوار حل می شوند و میانگین و انحراف معیار مقدار تابع هدف بدست آمده از هر دو مدل برای پنج سناریو مورد ارزیابی قرار می گیرد. هر دو مدل توسط نرم افزار بهینه سازی GAMS/BARON 12.6 حل می شوند که در این نرم افزار از الگوریتم شاخه-کران (Branch-and-Bound) و سیمپلکس ثانویه (Duality) برای حل مسئله استفاده می شود. نتایج حل مدل قطعی و استوار برای پنج سناریو در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): نتایج حل مدل قطعی و استوار برای پنج سناریو

سناریو	CV استوار	CV قطعی	سطح عدم قطعیت
۱/۲	۲۲/۵۵	۶/۶۱	-
۱/۴	۲۳/۸۷	۱۰/۴۷	-
۱/۶	۵/۳۰	۱۲/۹۲	-
۱/۸	۷	۲۰/۰۹	-

جدول (۴): مقدار پارامتر های قطعی مساله استوار

پارامتر	توضیحات	مقدار	واحد
cp_1	ظرفیت تولید کننده اول	۱۱۰۰	واحد کالا
cp_2	ظرفیت تولید کننده دوم	۱۲۰۰	واحد کالا
cad_1	ظرفیت نگهداری توزیع کننده اول	۱۴۰۰	واحد کالا
cad_2	ظرفیت نگهداری توزیع کننده دوم	۱۴۰۰	واحد کالا
DC_1	ظرفیت حمل و نقل جاده ای	۱۰۰۰	واحد کالا
DC_2	ظرفیت حمل و نقل ریلی	۱۳۰۰	واحد کالا
DC_3	ظرفیت حمل و نقل آبی	۱۶۰۰	واحد کالا
DC_4	ظرفیت حمل و نقل هوایی	۸۰۰	واحد کالا
PC_{11}	هزینه تولید محصول اول برای تولید کننده اول	۱۰	واحد پولی
PC_{21}	هزینه تولید محصول دوم برای تولید کننده اول	۹	واحد پولی
PC_{12}	هزینه تولید محصول اول برای تولید کننده دوم	۹	واحد پولی
PC_{22}	هزینه تولید محصول دوم برای تولید کننده دوم	۱۱	واحد پولی
HC_{11}	هزینه نگهداری محصول اول برای توزیع کننده اول	۴	واحد پولی
HC_{21}	هزینه نگهداری محصول دوم برای توزیع کننده اول	۵	واحد پولی
HC_{12}	هزینه نگهداری محصول اول برای توزیع کننده دوم	۵	واحد پولی
HC_{22}	هزینه نگهداری محصول دوم برای توزیع کننده دوم	۴	واحد پولی
CS_1	هزینه ثابت آماده سازی برای تولید کننده اول در هر دوره	۱۳	واحد پولی
CS_2	هزینه ثابت آماده سازی برای تولید کننده دوم در هر دوره	۱۴	واحد پولی
SP_{1k}	قیمت فروش محصول اول به مصرف کننده	۱۰۰	واحد پولی
SP_{2k}	قیمت فروش محصول دوم به مصرف کننده	۱۲۰	واحد پولی

سود میانگین) ولی مدل استوار با انحراف استاندارد ۷/۳۴۵ همچنان کنترل پذیر است و لذا در شرایط بحرانی، استفاده از مدل استوار ضروری است. برای تحلیل دقیقتر نسبت ضریب تغییرات را محاسبه می نماییم.

$$CV = \sigma/\mu \times 100\%$$

جدول (۶): مقایسه ضریب تغییرات مدل قطعی و استوار

سطح عدم قطعیت	CV قطعی	CV استوار	بهبود
۰/۲	٪۶/۶۱	٪۲/۵۵	٪۶۱/۲
۰/۴	٪۱۰/۲۷	٪۳/۸۷	٪۶۳
۰/۶	٪۱۴/۹۴	٪۵/۳۰	٪۶۲/۵
۰/۸	٪۲۰/۰۹	٪۷	٪۵/۲۲

با توجه به اطلاعات جدول (۶)، مدل استوار ضریب تغییرات (CV) را نسبت به مدل قطعی در همه سطوح عدم قطعیت بیش از ٪۶۰ کاهش می دهد (بهبود ٪۶۱،۲ تا ٪۶۵،۲). این نشان می دهد که مدل استوار نسبت ریسک-بازده را به طور معناداری بهبود می بخشد و در شرایط عدم قطعیت کارا تر است، زیرا تضمین می کند که حتی در بدترین سناریو، راه حل امکان پذیر باقی می ماند و از انحرافات شدید که می توانند منجر به زیان شوند، جلوگیری می کند و به عبارتی با کاهش نوسانات و ضریب تغییرات، مدل استوار احتمال قرارگیری در شرایط زیان ده را کاهش می دهد، هر چند ارزیابی دقیق این احتمال نیازمند تحلیل سناریوهای بیشتری است.

۷- جمع بندی و ارایه پیشنهادات برای تحقیقات آتی

این تحقیق یک مدل بهینه سازی استوار MINLP برای برنامه ریزی یکپارچه تولید-توزیع در زنجیره تأمین سه سطحی با استفاده از رویکرد برتسیماس-سیم ارائه کرده است. مدل پیشنهادی عدم قطعیت در تقاضا و هزینه های حمل و نقل را در چهار مد حمل (جاده ای، ریلی، دریایی و هوایی) به صورت همزمان مدیریت می کند.

۷-۱- یافته های کلیدی تحقیق عبارتند از

۱. برتری مدل استوار در کاهش ریسک: نتایج عددی نشان داد که مدل استوار در همه سطوح عدم قطعیت (۰،۲،۰،۴،۰،۶،۰،۸) انحراف معیار را نسبت به مدل قطعی بین ٪۶۲ تا ٪۶۵ کاهش می دهد، در حالی که میانگین سود تنها ٪۰/۷۵ تا ٪۱/۷۹ کاهش می یابد.

نتایج حاصل از حل مدل های قطعی و استوار در چهار سطح عدم قطعیت (۰،۲،۰،۴،۰،۶،۰،۸) و برای پنج سناریوی تصادفی، یافته های قابل توجهی را آشکار نمود:

الف) برتری مدل استوار در کاهش نوسانات:

همان گونه که در جدول (۳) مشاهده می شود، مدل استوار توانسته است انحراف استاندارد سود را به طور چشمگیری کاهش دهد. در بالاترین سطح عدم قطعیت ۰/۸ مدل استوار توانسته نوسانات را تا ٪۶۵،۴ کاهش دهد که نشان دهنده قدرت بالای این رویکرد در شرایط بحرانی است. این کاهش قابل ملاحظه در ریسک، به مدیران اطمینان می دهد که برنامه های تولید و توزیع در برابر تحولات غیرمنتظره بازار مقاوم خواهند بود.

ب) تحلیل قیمت استواری (Price of Robustness - POR)

قیمت استواری نشان دهنده میزان کاهش سود به ازای دستیابی به پایداری است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$POR = \frac{\text{Profit}_{\text{det}}(\rho) - \text{Profit}_{\text{rob}}(\rho)}{\text{Profit}_{\text{det}}(\rho)} \times 100\%$$

جدول (۵): مقایسه قیمت استواری (POR) و سود مدل های قطعی و استوار

PRO	سود استوار	سود قطعی	سطح عدم قطعیت
۱/۷۹٪	۱۲۲/۳۲۰	۱۲۴/۵۶۷	۰/۲
۰/۹۰٪	۱۱۷/۸۵۶	۱۱۸/۹۱۳	۰/۴
۰/۹۹٪	۱۱۱/۲۳۴	۱۱۲/۳۲۵	۰/۶
۰/۷۵٪	۱۰۴/۸۹۰	۱۰۵/۶۷۸	۰/۸

در جدول (۵) قیمت استواری در چهار سطح عدم قطعیت محاسبه شده است. مطابق با داده های جدول فوق، قیمت استواری در تمامی سطوح عدم قطعیت زیر ٪۲ باقی مانده است. این یافته بسیار مهم است زیرا نشان می دهد سازمان می تواند با از دست دادن تنها کمتر از ٪۲ سود، ریسک خود را تا ٪۶۵ کاهش دهد. ضریب تغییرات (CV) مدل استوار در همه سطوح عدم قطعیت به طور معناداری کمتر بوده و نشان دهنده کارایی بالاتر مدل استوار در مدیریت ریسک است.

در سطح پایین عدم قطعیت (۰،۲) مدل قطعی عملکرد نسبتاً قابل قبولی دارد و لذا در محیط های با ثبات نسبی، مدل قطعی کفایت می کند. در سطح متوسط عدم قطعیت (۰/۴ و ۰/۶) با افزایش تدریجی انحراف استاندارد در مدل قطعی مواجه هستیم ولی مدل استوار همچنان پایداری خود را حفظ می کند و لذا محیط ایده آل برای استفاده از مدل استوار می باشد. در سطح بالای عدم قطعیت (۰،۸) انحراف استاندارد مدل قطعی به ۲۱/۲۳۴ می رسد (تقریباً ٪۲۰).

۷-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

بر اساس محدودیت‌های شناسایی شده و نتایج این تحقیق، پیشنهادات زیر برای مطالعات آینده ارائه می‌شود:

۱. توسعه مدل به ابعاد بزرگ‌تر

استفاده از الگوریتم‌های فرا-ابتکاری (مانند الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید، یا بهینه‌سازی ازدحام ذرات) برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس

به‌کارگیری تکنیک‌های تجزیه مانند Benders Decomposition برای کاهش زمان حل انجام تحلیل حساسیت روی ابعاد مختلف شبکه برای ارزیابی قابلیت تعمیم مدل

۲. گسترش فرضیات مدل

مدل‌سازی زمان تحویل به‌عنوان یک پارامتر تصادفی یا فازی گنجانیدن امکان کمبود با اضافه کردن متغیرهای Backorder و هزینه‌های جریمه

در نظر گرفتن صرفه‌های مقیاس با استفاده از توابع هزینه غیرخطی یا تکه‌ای-خطی (Piecewise Linear)

مدل‌سازی محدودیت‌های ظرفیت دینامیک و چندمحصولی

۳. توسعه رویکردهای هیبریدی

ترکیب رویکرد برتسیماس-سیم با برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای استفاده از مزایای هر دو رویکرد استفاده از یادگیری ماشین برای تخمین پارامترهای بهینه بودجه عدم قطعیت (T)

به‌کارگیری مجموعه‌های عدم قطعیت داده‌محور (Data-Driven) و Conformal Prediction برای تخمین بازه‌های اطمینان واقع‌بینانه

۴. مقایسه تطبیقی

مقایسه جامع رویکرد برتسیماس-سیم با برنامه‌ریزی تصادفی و فازی در شرایط مختلف عدم قطعیت

ارزیابی عملکرد رویکردهای مختلف استوار (مانند Ben-Tal & Nemirovski و Soyster) در همین مسئله

تحلیل حساسیت نسبت به ساختار مجموعه عدم قطعیت

۵. اعتبارسنجی عملی

استفاده از داده‌های واقعی از صنایع مختلف (خودروسازی، دارویی، غذایی) برای اعتبارسنجی مدل

پیاده‌سازی مدل در یک مطالعه موردی صنعتی و ارزیابی نتایج در شرایط واقعی

بررسی کاربرد مدل در زنجیره‌های تامین حلقه بسته (-Closed Loop) با در نظر گرفتن بازیافت و لجستیک معکوس

۲. بهبود نسبت ریسک-به-بازده: مدل استوار ضریب تغییرات (CV) را نسبت به مدل قطعی بین ۶۱/۴٪ تا ۶۵/۲٪ بهبود می‌بخشد، که نشان‌دهنده افزایش پایداری و کاهش نوسانات در شرایط عدم قطعیت است.

۳. قیمت استواری قابل قبول: تحلیل POR نشان داد که با افزایش سطح عدم قطعیت، قیمت استواری کمتر از ۲٪ باقی می‌ماند، که این امر کارایی رویکرد برتسیماس-سیم را تأیید می‌کند.

۴. انعطاف‌پذیری در سطوح محافظه‌کاری: پارامتر بودجه عدم قطعیت (I) امکان تنظیم تعادل بین بهینگی و استواری را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد بر اساس سیاست‌های ریسک سازمان، سطح محافظه‌کاری مدل را تنظیم کنند.

این نتایج نشان می‌دهند که رویکرد استوار برتسیماس-سیم یک ابزار کارآمد برای مدیریت عدم قطعیت در زنجیره‌های تامین چندسطحی است و می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد عملی برای تصمیم‌گیری استراتژیک در محیط‌های کسب‌وکار با عدم قطعیت بالا مورد استفاده قرار گیرد.

۷-۲- محدودیت‌های تحقیق

این مطالعه با محدودیت‌هایی روبه‌رو بوده است که می‌تواند فرصت‌هایی برای تحقیقات آینده ایجاد کند:

۱. مقیاس شبکه: شبکه $2 \times 2 \times 2$ به‌عنوان یک نمونه اثبات مفهوم و مطابق با مطالعات مشابه انتخاب شده است. این مقیاس به دلیل پیچیدگی محاسباتی مدل MINLP و منابع محاسباتی محدود انتخاب گردید.

۲. فرضیات ساده‌کننده: برخی فرضیات از جمله زمان تحویل ناچیز، عدم امکان کمبود، و هزینه‌های خطی (بدون صرفه‌های مقیاس) در راستای تمرکز بر جنبه استراتژیک برنامه‌ریزی و کاهش پیچیدگی محاسباتی اعمال شده‌اند. این فرضیات در مطالعات پایه‌ای استوار (Pishvae et al., 2011; Aghezzaf et al., 2011) نیز رایج است.

۳. داده‌های تصادفی: به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی صنعتی، از داده‌های تصادفی با بازه‌های منطقی استفاده شده است. استفاده از داده‌های واقعی می‌تواند اعتبار نتایج را افزایش دهد.

۴. عدم مقایسه با روش‌های دیگر: این تحقیق بر ارائه و ارزیابی رویکرد برتسیماس-سیم متمرکز بوده است. مقایسه تطبیقی با برنامه‌ریزی تصادفی یا فازی می‌تواند موضوع یک مطالعه جامع مستقل باشد.

considering uncertainty in demand and number of donors. *Journal of Healthcare Management*, 12(3), 47-65. (In Persian)

[14] Amirian, S., Amiri, M., & Taghavifard, M. T. (2019). Designing a sustainable and reliable supply chain network under uncertainty: Case study of carton industry. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(3), 115-142. (In Persian)

[15] Hassan-pour, H. A., Fatahi, H., & Khalili, H. (2020). Multimodal transportation: Approaches, formation process, benefits, defects and constraints of implementation. *Logistics and Supply Chain Management Journal*, 8(2), 23-48. (In Persian)

[16] Rahbari, M., Khamseh, A. A., & Mohammadi, M. (2023). Robust optimization and strategic analysis for agri-food supply chain under pandemic crisis: Case study from an emerging economy. *Expert Systems with Applications*, 225, 120081.

[17] Bhowmik, O., & Parvez, S. (2024). Supply chain network design: a MILP and Monte Carlo simulation approach. *Brazilian Journal of Operations & Production*.

[18] Gitinavard, H., Solgi, E., Mousavi, S. M., & Makui, A. (2025). A bi-phase robust possibilistic model for hub location-routing problem in cold chain logistics of perishable products. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 22(4). Management, 21(1), 1936-1936

[19] Z. Yang, & S. Liu, "Fairness-oriented multi-objective optimization of supply chain planning under uncertainties," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 99, pp. 102-198, 2025.

۶. توسعه سیستم پشتیبانی تصمیم

طراحی یک سیستم پشتیبانی تصمیم (DSS) برای پیاده‌سازی

مدل در محیط‌های صنعتی

توسعه رابط کاربری گرافیکی (GUI) برای تسهیل استفاده از مدل

توسط تصمیم‌گیرندگان

یکپارچه‌سازی مدل با سیستم‌های ERP و SCM موجود در

سازمان‌ها

این پیشنهادات می‌تواند مسیرهای تحقیقاتی مفیدی را برای

توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر برنامه‌ریزی زنجیره تأمین تحت

عدم قطعیت فراهم کند و به پل زدن بین تحقیقات آکادمیک و

کاربردهای صنعتی کمک نماید.

۸- مراجع

- [1] E. H. Aghezzaf, B. Raa, & H. Van Landeghem, "Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products. *European Journal of Operational Research*," vol. 169(3), pp. 1048-1063, 2006. doi: [10.1016/j.ejor.2005.02.008](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.008)
- [2] D. Bertsimas, & M. Sim, "The price of robustness," *Operations Research*, vol. 52(1), pp. 35-53, 2004. doi: [10.1287/opre.1030.0065](https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065)
- [3] S. E. Mirzapour Al-e-hashem, H. Malekly, & M. B. Aryanezhad, "A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty," *International Journal of Production Economics*, vol. 134(1), pp. 28-42. 2011. doi: [10.1016/j.ijpe.2011.01.027](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.027)
- [4] M. S. Pishvaei, J. Razmi, & S. A. Torabi, "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 206, pp. 1-20, 2012. doi: [10.1016/j.fss.2012.04.010](https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010)
- [5] Selim, H., Araz, C., & Ozkarahan, I. (2008). Collaborative production-distribution planning in supply chain: A fuzzy goal programming approach. *Transportation Research Part E*, 44(3), 396-419. doi: [10.1016/j.tre.2006.11.001](https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.11.001)
- [6] Soyster, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21(5), 1154-1157. doi: [10.1287/opre.21.5.1154](https://doi.org/10.1287/opre.21.5.1154)
- [7] Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2002). Robust optimization—methodology and applications. *Mathematical Programming*, 92(3), 453-480. doi: [10.1007/s101070100286](https://doi.org/10.1007/s101070100286)
- [8] Gabrel, V., Murat, C., & Thiele, A. (2014). Recent advances in robust optimization: An overview. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 471-483. doi: [10.1016/j.ejor.2013.09.036](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.036)
- [9] Chen, Z. L., & Vairaktarakis, G. L. (2005). Integrated scheduling of production and distribution operations. *Management Science*, 51(4), 614-628. doi: [10.1287/mnsc.1040.0325](https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0325)
- [10] Fahimnia, B., Farahani, R. Z., Marian, R., & Luong, L. (2013). A review and critique on integrated production-distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 1-19. doi: [10.1016/j.jmsy.2012.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.005)
- [11] Peidro, D., Mula, J., Poler, R., & Lario, F. C. (2009). Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(3-4), 400-420. doi: [10.1007/s00170-008-1715-y](https://doi.org/10.1007/s00170-008-1715-y)
- [12] Sahinidis, N. V. (2004). Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7), 971-983. doi: [10.1016/j.compchemeng.2003.09.017](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.017)
- [13] Mozafari, M., & Sobhani-Manesh, S. (2021). A multi-objective possibilistic model to platelet supply chain network design