

## Proposing a Robust Optimization Model for Sustainable Supply Chain of Perishable Dairy Products

(Document Type: Research Paper)

### Fahimeh Shafiee

Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran,  
Tehran, Iran, shafiee\_fahime@ut.ac.ir

### Aliyeh Kazemi \*

Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran,  
Tehran, Iran, aliyehkazemi@ut.ac.ir

### Ahmad Jafarnejad

Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran,  
Tehran, Iran, jafarnjd@ut.ac.ir

### Zeinab Sazvar

Department of Industrial Engineering, School of Engineering, University of Tehran,  
Tehran, Iran, sazvar@ut.ac.ir

### Hannan Amoozad Mahdiraji

Department of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran,  
Tehran, Iran, h.amoozad@ut.ac.ir

**Purpose:** This paper aims to design a three-level sustainable dairy supply chain under uncertain conditions. Mixed-integer nonlinear programming proposed to optimize the total costs taking into account the environmental and social considerations of a multi-period and multi-product chain applied to a dairy company. The delivery time and the first-in-first-out (FIFO) policy of the products are of particular importance in the proposed model.

**Design/methodology/approach:** A dairy supply chain in Iran investigated as a real case study and the authors considered various numerical experiments, and evaluated the developed model. The primary sources of data used in this study were from the Pak Company. The suggested mathematical model coded in the GAMS 2017 software. Due to the uncertainty of economic parameters and demand, a robust-heuristic optimization approach used to solve the proposed model.

**Findings:** Results indicated that the values of the objective function were close together in the deterministic and robust conditions. This finding outlined the proper performance of the model under uncertainty. The outputs of the three solution methods (MINLP, MILP, and the heuristic method), indicated a higher heuristic approach performance regarding the two other approaches based on the value of the objective function and the time to solve the problem. Besides, based on the sensitivity analysis, the objective function displayed a direct relationship with the demand change, and as demand increased at different levels of uncertainty, costs increased either. Furthermore, the impact of

---

\* Corresponding author

product life cycle on cost target was different and in each scenario, increasing product lifespan led to reduced costs of the supply chain with different scenarios.

**Research limitations/implications:** The most significant research limitations were the lack of issues related to production planning such as integrated production strategies and overtime, consideration of equal volume and weight capacity for vehicles, and integration of three aspects of sustainability in a goal function. Studying issues related to production planning, including production under different strategies of integrated production and overtime; the use of diverse and heterogeneous vehicles and the selection of a suitable one for transporting raw materials and products; multi-objective mathematical modelling; and the development of meta-heuristic algorithms to solve the model are suggestions for future research.

**Practical implications:** According to the results, conducting robust models can lead managers to make integrated decisions in uncertain situations. They can decide about the optimal flow of materials in the production of flexible products in a dairy supply chain. The perishability of products (especially products with a short shelf life) adds the complexity of inventory. Therefore, managers can minimize inventory costs by considering the exit issuance system in the order of product entry. Besides, if the company attempts to move to the triple bottom line evaluation of economic, environmental, and social performance, it can use the proposed structure and research solution model.

**Social implications:** The results of the model presented to the meeting of the company's board of directors. Since the proposed model provides a framework for measuring social responsibility, highly recognized by managers, and all agreed on its applicability to the company. This model creates values that lead the company to move towards social responsibility, from which it was far in recent years. Due to the various lifespan of products and their importance in environmental pollution, production managers in the dairy supply chain should adopt appropriate decisions in the production system with highest durability and minimal environmental pollution, which will lead to economic growth in this industry.

**Originality/value:** Compared to previous studies, this study is one of the first quantitative studies wherein, a multi-level/multi-product supply chain considered in the dairy industry.

In this paper, the social costs of sustainability such as job creation cost for individuals, layoffs, and lost working days simultaneously investigated concerning economic and environmental perspectives in the uncertain environment (demand, transportation costs, production costs, holding costs, and capacity of facilities considered as uncertain parameters). Since dairy products widely used in delivering food in the daily diet plan, due to the risky distribution of dairy products, the authors recognized the loss of quality and expiry date of products in the proposed model. Due to the high demand for dairy products, subjects such as time for delivery, and first-in-first-out (FIFO) policy of products were of particular importance in the proposed model.

**Keywords:** Sustainable supply chain, Perishable products, Robust optimization, FIFO issuance policy

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۱، شماره ۳، پیاپی ۲۲، پاییز ۱۳۹۹

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱

صص: ۴۶-۱۷ (نوع مقاله: پژوهشی)

## ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار زنجیره تأمین پایدار برای محصولات فسادپذیر لبنی

فهیمة شفیعی<sup>۱</sup>، عالیہ کاظمی<sup>۲\*</sup>، احمد جعفرنژاد چقوشی<sup>۳</sup>، زینب سازور<sup>۴</sup>، حنان عموزاد مهدیرجی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکترای مدیریت تحقیق در عملیات، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

shafiee\_fahime@ut.ac.ir

۲- دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

aliyekhazemi@ut.ac.ir

۳- استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

jafarnjd@ut.ac.ir

۴- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

sazvar@ut.ac.ir

۵- استادیار گروه مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

h.amoozad@ut.ac.ir

**چکیده:** هم‌روزه، مواد و محصولات فسادپذیر بسیاری در زنجیره تأمین از تأمین‌کننده به تولیدکننده و سپس خرده‌فروش منتقل می‌شود. به‌علت طول عمر محدود و محدودیت در نگهداری محصولات فسادپذیر، هزینه‌های عملیاتی و حمل‌ونقل و آثار محیطی این نوع محصولات افزایش می‌یابد. هدف پژوهش حاضر، طراحی مدلی ریاضی برای زنجیره تأمین پایدار سه‌سطحی چنددوره‌ای-چندمحصولی در صنعت لبنیات در شرایط عدم قطعیت است که محصولات براساس سیاست صدور خروج به‌ترتیب ورود از انبار تخلیه می‌شود. بدین‌منظور، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه شده است که هزینه‌های کل زنجیره را با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی و اجتماعی بهینه می‌کند. برای حل مدل، یک رویکرد بهینه‌سازی استوار-ابتکاری با توجه به عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی، ظرفیت تسهیلات و تقاضا به کار گرفته شده است. نتایج، کارایی و قابلیت کاربرد مدل ارائه‌شده و دستیابی به راه حل‌های باکیفیت در زمان منطقی را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش را شرکت‌ها برای تصمیم‌گیری درباره کاهش هزینه‌های سربسر و آثار زیست‌محیطی و اجتماعی فعالیت‌ها می‌توانند استفاده کنند.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره تأمین پایدار، محصولات فسادپذیر، بهینه‌سازی استوار، سیاست صدور خروج به

ترتیب ورود

## ۱. مقدمه

پایداری در مدیریت زنجیره تأمین به یک الزام برای کسب‌وکارها تبدیل شده و توجه زیاد دانشگاهیان و صنایع را به خود جلب کرده است (آرمنپتزی و مینیس<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). کوشش برای ادغام مسائل پایداری در مدیریت زنجیره تأمین به روش‌های مختلفی، از جمله زنجیره تأمین سبز و زنجیره تأمین پایدار انجام شده است که به دنبال توجه به مسائل اقتصادی، محیطی و اجتماعی در زنجیره تأمین است. مشارکت بخش‌های مختلف برای ایجاد ارزش افزوده برای مشتری، تعاملات برنده-برنده برای همه اعضای زنجیره به وجود می‌آورد (محمد<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). در بازارهای رقابتی، تنها راه غلبه بر رقبا در کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود سطح خدمت، توجه هم‌زمان به ملاحظات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی زنجیره تأمین است. به گفته پژوهشگران، ۸۰ درصد گازهای گلخانه‌ای و ۳۶ درصد گاز دی‌اکسیدکربن منتشر شده در جو زمین به علت فعالیت‌های زنجیره تأمین است (نونس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶)؛ بنابراین، سازمان‌ها از یک سو باید به سوددهی و مزیت رقابتی و از سوی دیگر به حداقل رساندن آثار محیطی و اجتماعی فعالیت‌هایشان توجه کنند (سینق<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی از بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین بخش‌های صنعت جهان، زنجیره تأمین مواد غذایی است که نقش مهمی در رشد اقتصادی دارد. ویژگی‌های مواد غذایی، به‌ویژه طول عمر، بر سه معیار پایداری، تأثیر زیادی دارد. به مواد غذایی فسادپذیر با طول عمر محدود به علت حجم زیاد ضایعات، آثار مضر زیست‌محیطی و شرایط خاص نگهداری و حمل‌ونقل، توجه زیادی می‌شود. علاوه بر این، بدون توجه به نوع محصول تولیدشده شرکت‌ها، جنبه اجتماعی پایداری، به‌ویژه در صنایعی که تولید با محوریت نیروی انسانی است، بسیار اهمیت دارد (سازور<sup>۵</sup> و سپهری<sup>۶</sup>، ۲۰۲۰). ساختار زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر، پیچیده‌تر است و عدم قطعیت و آسیب‌پذیری بیشتری دارد (دنگ<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). از جمله این محصولات فسادپذیر، محصولات لبنی است که به گفته پژوهشگران، به علت حجم زیاد متان تولیدشده برای تهیه این محصولات، اثر زیادی بر گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد.

امروزه، نقش مهم مدیریت تولید و موجودی در زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر به اثبات رسیده است. بهینه‌سازی فعالیت‌های مدیریت تولید و موجودی برای مدت‌زمان طولانی بدون توجه به آثار منفی احتمالی این فعالیت‌ها بر محیط و اجتماع، بر مبنای معیار اقتصادی بوده است. در دهه گذشته، علاقه‌مندی پژوهشگران به این موضوع افزایش یافته و چندین مسئله در این حوزه با ملاحظات محیطی بازبینی شده است (سباق‌نیا<sup>۸</sup> و طالعی‌زاده<sup>۹</sup>، ۲۰۲۰). این مطالعات اندک، از نظر بُعد محیطی، بیشتر بر انتشارات کربن تمرکز کرده‌اند و تخمین انتشار گازهای گلخانه‌ای و ضایعات در آنها به ندرت دیده می‌شود (والدرا<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، مطالعات اندکی به ارائه مدل کمی برای بهینه‌کردن تصمیم‌های تولید و موجودی با در نظر گرفتن جنبه اجتماعی پایداری توجه کرده‌اند (مانی<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). بر اساس اهداف توسعه پایدار، ابعاد اجتماعی پایداری، دربردارنده عدالت، سلامت، تحصیلات، زیرساخت‌ها و شرایط زندگی است که عدالت اجتماعی، حالتی از تساوی در شرایط، قوانین و فرصت‌های شغلی است (طالعی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸). فرصت‌های شغلی ایجادشده براساس نرخ بیکاری و استخدام نیروی کار اندازه‌گیری می‌شود که به ندرت در مدل‌های مدیریت تولید و موجودی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، انجام دادن پژوهشی برای بهینه‌کردن مسئله مدیریت تولید و موجودی محصولات لبنی با معیارهای

پایداری در زنجیره تأمین متمرکز چندسطحی و چندمحصولی ضروری است. در تأیید این ادعا، چندین مطالعه، از جمله شمایل<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، داروم<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) و تیواری<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در پیشنهادهاى خود بر انجام دادن چنین پژوهشى تأکید کرده‌اند.

### ۱.۱ پیشینه پژوهش

شمایله و همکاران (۲۰۱۹)، بهینه‌کردن استراتژی بازپرسازی برای یک شرکت را بررسی کردند که با تقاضای متغیر وابسته به زمان برای محصولات با حساسیت دمایی روبرو بود و کربن منتشرشده از فعالیت‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی را نیز در نظر گرفتند. در این پژوهش، سه مدل ریاضی، شامل به حداقل رساندن هزینه، به حداقل رساندن اثر کربن و مدل ترکیبی ارائه شده است که معیارهای اقتصادی و محیطی را ترکیب می‌کند.

تیواری و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل مدیریت موجودی پایدار را با یک فروشنده و یک خریدار برای محصولات فسادپذیر ارائه دادند. هدف پژوهش، ارائه خط‌مشی برای تصمیم‌گیری درباره مقدار حمل‌ونقل و سطح موجودی برای حداقل‌سازی هزینه‌ها و آثار کربن بود. نتایج نشان داد مدل یکپارچه در کاهش هزینه و انتشارات کربن، کارا بوده است.

یاوری<sup>۱۵</sup> و گرائیلی<sup>۱۶</sup> (۲۰۱۹)، یک زنجیره حلقه‌بسته برای محصولات فسادپذیر در صنایع لبنی با عدم قطعیت تقاضا طراحی کردند؛ سپس یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددی صحیح مختلط<sup>۱۷</sup> برای کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی و آلاینده‌ها و یک مدل استوار برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مقابله با عدم قطعیت مسئله ارائه کردند.

در جدول شماره ۱، خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده و مشخصات پژوهش حاضر آورده شده است. مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد، تعدادی از پژوهشگران، از جمله سازور و سپهری (۲۰۲۰)، جنتیان<sup>۱۸</sup> و همکاران (۲۰۱۹) و داروم و همکاران (۲۰۱۸)، ۳ بُعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در مدل‌سازی زنجیره تأمین پایدار، هم‌زمان ادغام کردند. یاوری و گرائیلی (۲۰۱۹)، شمایل و همکاران (۲۰۱۹) و کونور<sup>۱۹</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، عدم قطعیت برخی از پارامترها را در زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن ۲ بُعد اقتصادی و زیست‌محیطی لحاظ کردند. یاوری و گرائیلی (۲۰۱۹) و حاجی میرزاجان<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، زمان انقضای محصولات را در طراحی زنجیره تأمین مورد بررسی در نظر گرفتند. در میان پژوهش‌های بررسی‌شده در این حوزه، فقط پاول وورم<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، به سیاست خروج محصولات از انبار (سیاست خروج به ترتیب ورود<sup>۲۲</sup>) در زنجیره تأمین توجه کردند. همچنین، احمدی<sup>۲۳</sup> و عبدالله‌زاده مقدم (۲۰۲۰)، سازور و سپهری (۲۰۲۰)، یاوری و گرائیلی (۲۰۱۹)، حاجی میرزاجان و همکاران (۲۰۱۵) و فهیم‌نیا<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، زنجیره تأمین چندمحصولی - چنددوره‌ای را در حوزه مورد مطالعه طراحی کردند. در پژوهش حاضر، حالت‌ها و مواردی که به‌صورت جداگانه در پژوهش‌های پیشین مطرح شده است، ترکیب و مدل جدیدی در حوزه زنجیره تأمین پایدار چندمحصولی - چنددوره‌ای با در نظر گرفتن زمان انقضای محصول و سیاست خروج محصولات از انبار در محیط عدم قطعیت برای محصولات فسادپذیر لبنی ارائه شده است.

پژوهش حاضر از اولین پژوهش‌های کمی است که یک زنجیره تأمین متمرکز چندسطحی و چندمحصولی - چنددوره‌ای با عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا، هزینه‌های اقتصادی و ظرفیت تسهیلات در صنعت لبنیات ارائه داده و هزینه‌های زیست‌محیطی تولید و حمل‌ونقل و هزینه‌های اجتماعی پایداری مانند استخدام و ایجاد شغل و اخراج برای اشخاص و روزهای کاری ازدست‌رفته را به‌طور هم‌زمان با بُعد اقتصادی در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت تولید و موجودی ترکیب کرده است. از آنجا که محصولات لبنی به‌طور گسترده در برنامه غذایی روزانه استفاده می‌شود و توزیع آنها با ریسک همراه است (به‌علت اثر مستقیم بر سلامت جامعه)، تاریخ انقضای محصولات در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. به‌علت تقاضای زیاد محصولات لبنی، زمان ارسال و سیاست صدور خروج به‌ترتیب ورود، اهمیت ویژه‌ای دارد که در مدل پیشنهادی لحاظ شده است.

در ادامه پژوهش، ضمن تعریف مسئله مد نظر، ویژگی‌های ساختاری مهم این مسئله معرفی می‌شود. با کمک این ویژگی‌ها و مفروضات، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای مسئله توسعه داده می‌شود. همچنین، برای حل مسئله، از رویکردی مبتنی بر بهینه‌سازی استوار و روش ابتکاری استفاده شده است. در بخش یافته‌ها، برای ارزیابی مدل توسعه‌داده‌شده، آزمایش‌های عددی مختلفی براساس مطالعه موردی واقعی زنجیره تأمین لبنیات در نظر گرفته شده است. در بخش نتیجه‌گیری و پیشنهادها نیز نتایج و دستاوردهای پژوهش و موضوع‌های پیشنهادی برای مطالعات آتی ارائه می‌شود.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین و جایگاه پژوهش حاضر

ردیف	نویسنده (سال)	حوزه مد نظر		ابعاد پایداری			تابع هدف		تعداد محصول		تعداد دوره		زمان انقضای محصول		سیاست صدور		پارامترهای عدم قطعیت	رویکرد حل
		موجودی	قبلی	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی	تک‌هدفه	چندهدفه	تک‌محصولی	چندمحصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	دارد	ندارد	FIFO	LIFO		
۱	احمدی و عبدالله‌زاده <sup>۲۶</sup> (۲۰۲۰)	*		*				*				*						الگوریتم ژنتیک رتبه‌ای
۲	جنتیان و همکاران (۲۰۱۹)	*		*		*		*		*		*						روش میانگین وزنی - الگوریتم‌های تکاملی
۳	حاجی میرزاجان و همکاران (۲۰۱۵)	*		*		*		*		*		*						سیپلکس
۴	سازور و سپهری (۲۰۲۰)	*		*		*		*		*		*						روش محدودیت اسپیلون اصلاح‌شده

ردیف	نویسنده (سال)	حوزه مد نظر		ابعاد پایداری			تابع هدف		تعداد محصول		تعداد دوره		زمان انقضای محصول		سیاست صدور		پارامترهای عدم قطعیت	رویکرد حل
		موجودی	تولید	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی	تک‌هدفه	چندهدفه	تک‌محصولی	چندمحصولی	تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	دارد	ندارد	FIFO	LIFO		
۵	یاوری و گرایلی (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			تقاضا، نرخ برگشت محصولات، کیفیت محصولات بازگشتی	الگوریتم ابتکاری (YAG)
۶	شمایله و همکاران (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			تقاضا	برنامه‌ریزی پویا
۷	واعظ <sup>۲۷</sup> و همکاران (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			-	محدودیت اسپیلون بهبود یافته
۸	طالعی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			-	-
۹	داروم و همکاران (۲۰۱۸)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			-	روش شاخه و کران
۱۰	تیواری و همکاران (۲۰۱۸)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			-	روش حل بهینه
۱۱	کونور و همکاران (۲۰۱۷)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			تقاضا	الگوریتم محدودیت اسپیلون و الگوریتم جست‌وجوی تکاملی
۱۲	هریجا <sup>۲۸</sup> و همکاران (۲۰۱۷)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			-	یک الگوریتم جست‌وجوی کارآمد <sup>۲۹</sup>

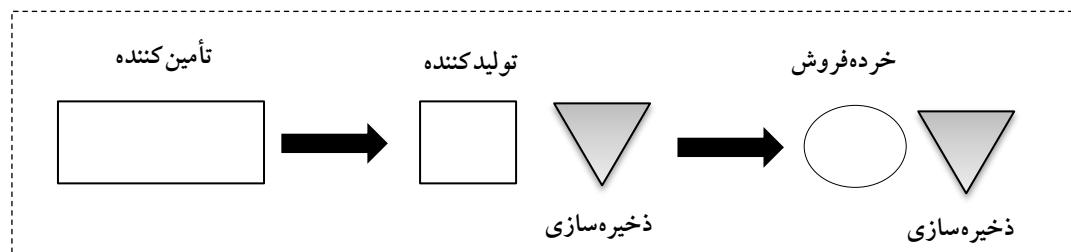
ردیف	نویسنده (سال)	حوزه مد نظر		ابعاد پایداری			تابع هدف		تعداد محصول		تعداد دوره		زمان انقضای محصول		سیاست صدور		پارامترهای عدم قطعیت	رویکرد
		موجودی	تولید	اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی	نگهدارنده	چند هدفه	تک محصولی	چند محصولی	تک دوره‌ای	چند دوره‌ای	دارد	ندارد	FIFO	LIFO		
۱۳	بزرگی <sup>۳۰</sup> (۲۰۱۶)	*		*	*					*			*				-	روش حل تقریبی
۱۴	باچری <sup>۳۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)	*		*	*					*			*				-	-
۱۵	اسچافر <sup>۳۲</sup> و کونور (۲۰۱۵)	*		*	*					*			*				تقاضا	روش وزنی نرمال شده
۱۶	فهم‌نیا و همکاران (۲۰۱۵)	*		*	*					*			*				-	آنتروپی متقابل یکپارچه
۱۷	پاول وورم و همکاران (۲۰۱۴)	*		*	*					*			*				تقاضا	حل کننده‌های مدل برنامه‌ریزی خطی
۱۸	ارسلان <sup>۳۳</sup> و ترکای <sup>۳۴</sup> (۲۰۱۳)	*		*	*					*			*				-	حل کننده‌های مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در نرم افزار GAMS
۱۹	پژوهش حاضر	*		*	*					*			*				تقاضا، ظرفیت تسهیلات، هزینه تولید، هزینه حمل و نقل، هزینه نگهداری موجودی	استفاده از روش‌های بهینه‌سازی استوار و ابتکاری



## ۲. مبانی نظری

همانگونه که بیان شد، به مسئله پایداری در زنجیره تأمین لبنیات به علت نبود مقررات سخت‌گیرانه کمتر توجه شده است. در صنعت لبنیات، تصمیم‌گیرندگان برای سودآوری بیشتر به سیاست‌های پایداری روی آورده‌اند؛ بنابراین، طراحی زنجیره تأمین سازگار با محیط زیست برای محصولات فاسدشدنی، با توجه به زمان انقضای این محصولات و عدم قطعیت تقاضا ضروری به نظر می‌رسد. محصول در مدیریت چرخه عمر آن، مراحل مختلفی را طی می‌کند. این مراحل، خصوصیات ویژه و نیاز به اقدامات ویژه‌ای دارد تا سازمان، بهترین سود را از مدیریت چرخه عمر به دست آورد. در مطالعه حاضر، یک زنجیره تأمین سه‌سطحی متمرکز رو به جلو برای محصولات فسادپذیر در نظر گرفته شده است. این سه سطح، شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده و خرده‌فروش است که دو سطح اول به تقاضای خرده‌فروش پاسخ می‌دهند. ذخیره‌سازی محصول در مکان‌های تولیدکننده و خرده‌فروش انجام می‌شود. علاوه بر این، هزینه‌های مرتبط با تولید گازهای گلخانه‌ای به علت تولید و حمل و نقل وجود دارد. مسئله مد نظر در مطالعه حاضر، تعیین تصمیم‌های بهینه تولید و موجودی با توازن هزینه‌های مرتبط، هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های اجتماعی است.

تأمین‌کننده‌ها مراکز دامپروری هستند که مواد اولیه (شیر) ضروری کارخانه تولیدی را بلافاصله پس از سفارش می‌فرستند. تولیدکنندگان، کارخانه‌های تولید لبنیات هستند که چندین محصول فسادپذیر تولید می‌کنند و برای برآوردن تقاضای مشتری نهایی، آنها را به خرده‌فروشان می‌فروشند. کمبود موجودی برای تولیدکننده امکان‌پذیر است. همچنین، به علت محدود بودن طول عمر محصولات فسادپذیر، موجودی مواد اولیه و محصولات براساس سیاست خروج به ترتیب ورود از انبار تخلیه می‌شود. پژوهش حاضر، جنبه اجتماعی پایداری مانند ایجاد شغل برای افراد، اخراج و روزهای ازدست‌رفته کاری درون زنجیره تأمین را به‌طور هم‌زمان با جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، در تصمیم‌های مرتبط با مدیریت تولید و موجودی در نظر می‌گیرد. به‌طور کلی، هدف، تعیین میزان موجودی و مقدار تولید هر یک از محصولات و ماده خام، میزان کمبود هر یک از محصولات، میزان سفارش تولیدکننده برای ماده خام، تعداد نیروی انسانی به‌کارگرفته‌شده و تعداد نیروی استخدام و اخراج‌شده، برای تأمین‌کننده و تولیدکننده است. همسو با این موضوع، محدودیت‌هایی همچون محدودیت‌های کنترل موجودی، مقدار محصول ذخیره‌شده، میزان کل تولید مواد و محصولات، سطح موجودی محصول، تعداد استخدام، تعداد کارگران در دوره‌های زمانی متوالی و محدودیت‌های خروج به ترتیب ورود محصولات از انبار وجود دارد. شکل شماره ۱، شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه برای محصولات لبنی

مدل ریاضی ارائه شده به صورت یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط<sup>۳۵</sup> تک هدفه است. مفروضات مدل به شرح ذیل است:

۱. پارامترهای تقاضا، هزینه های حمل و نقل، هزینه های تولید، هزینه های نگهداری موجودی و ظرفیت تسهیلات، دارای عدم قطعیت هستند.
۲. کمبود (برای تولیدکننده) مجاز است.
۳. میزان حمل مواد اولیه به ضریب مصرف ماده اولیه در هر محصول بستگی دارد.
۴. تقاضای مشتری نهایی در برخی دوره ها می تواند برآورده نشود.
۵. تأمین کنندگان و مشتریان در مکان های فیزیکی ثابتی مستقر هستند.
۶. ظرفیت تسهیلات، محدود است.
۷. ظرفیت حجمی و وزنی وسایل نقلیه، یکسان فرض شده است.
۸. موجودی محصول براساس سیاست صدور خروج به ترتیب ورود از انبار تخلیه خواهد شد.
۹. محصول دارای ماندگاری در دوره های  $\text{ExpDate}(p)$  است؛ یعنی از کالای تولید شده در دوره زمانی  $i$  می توان برای تأمین تقاضا تا دوره  $\text{ExpDate}(p)+i$  استفاده کرد؛ در غیر این صورت، پس از دوره  $\text{ExpDate}(p)+i$  خراب می شود.
۱۰. هر دسته تولیدی از یک محصول، تاریخ انقضای یکسان دارد.
۱۱. ارزش مواد و محصولات در مدت طول عمر قابل استفاده بودن آنها کاهش نمی یابد.
۱۲. کمبود موجودی به صورت تقاضای پس افت نسبی<sup>۳۶</sup> در نظر گرفته می شود که بخشی از آن، پس افت و بخش دیگر، فروش از دست رفته<sup>۳۷</sup> است.

### ۳. روش شناسی پژوهش

#### ۱,۳ مدل سازی مسئله

اندیس ها، پارامترها، متغیرها، تابع هدف و محدودیت های مسئله مد نظر در ادامه در جدول شماره ۲ آمده است:

جدول ۲- اندیس ها، پارامترها و متغیرهای مدل

اندیس ها	
$i, j, z$	افق برنامه ریزی، $i, j, z = 1, \dots, n$ (n برابر با ۱۲ ماه است).
$p$	محصولات، $p = 1, 2, \dots, P$
$s$	تأمین کنندگان، $s = 1, 2, \dots, S$
$r$	خرده فروشان، $r = 1, 2, \dots, R$
$k$	مواد اولیه، $k = 1, 2, \dots, K$
$m$	تولید کنندگان، $m = 1, 2, \dots, M$
$v$	نوع وسیله نقلیه، $v = 1, 2, \dots, V$

پارامترها	
هزینه راه‌اندازی	
هزینه راه‌اندازی تولیدکننده $m$ برای محصول $p$	$OCF_{mp}$
هزینه حمل‌ونقل	
هزینه حمل‌ونقل برای مواد اولیه $k$ از تأمین‌کننده $s$ به تولیدکننده $m$ با وسیله نقلیه $v$ در دوره زمانی $i$	$TCI_{ksmvi}$
هزینه حمل‌ونقل برای محصول $p$ از تولیدکننده $m$ به خرده‌فروش $r$ با وسیله نقلیه $v$ در دوره زمانی $i$	$TCJ_{mrvpi}$
هزینه نگهداری موجودی	
هزینه نگهداری موجودی برای هر واحد محصول $p$ برای تولیدکننده $m$ در هر دوره زمانی	$HNF_{pm}$
هزینه نگهداری موجودی برای هر واحد محصول $p$ برای خرده‌فروش $r$ در هر دوره زمانی	$HNJ_{pr}$
هزینه خرید	
هزینه خرید هر واحد محصول $p$ از تولیدکننده $m$ توسط خرده‌فروش $r$ در دوره زمانی $i$	$PC_{pmri}$
هزینه خرید هر واحد مواد اولیه $k$ از تأمین‌کنندگان $s$ توسط تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$PCR_{ksmi}$
هزینه تولید	
هزینه تولید محصول $p$ توسط تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$PMC_{pmi}$
هزینه تولید مواد اولیه $k$ توسط تأمین‌کنندگان $s$ در دوره زمانی $i$	$PKC_{ksi}$
هزینه کمبود	
هزینه کمبود محصول $p$ در دوره زمانی $i$	$PSC_{pi}$
هزینه فروش از دست‌رفته	
هزینه فروش از دست‌رفته برای محصول $p$ توسط تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$LSC_{pmi}$
هزینه فاسدشدن	
هزینه فاسدشدن محصول $p$ برای تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$CSC_{pmi}$
هزینه اجتماعی	
هزینه استخدام یک نیرو توسط تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$LLC_{mi}$
هزینه اخراج یک نیرو توسط تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$LBC_{mi}$
هزینه حقوق و دستمزد نیروی انسانی برای تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$HIC_{mi}$
هزینه روزهای از دست‌رفته کاری برای تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$LDC_{mi}$
هزینه استخدام یک نیرو توسط تأمین‌کننده $s$ در دوره زمانی $i$	$LS_{si}$
هزینه اخراج یک نیرو توسط تأمین‌کننده $s$ در دوره زمانی $i$	$LBS_{si}$
هزینه حقوق و دستمزد نیروی انسانی برای تأمین‌کننده $s$ در دوره زمانی $i$	$HIS_{si}$
هزینه روزهای از دست‌رفته کاری برای تأمین‌کننده $s$ در دوره زمانی $i$	$LDS_{si}$
ظرفیت تسهیلات	
ظرفیت تولیدکننده $m$ برای محصول $p$ در دوره زمانی $i$	$CapM_{mpi}$
ظرفیت تأمین‌کننده $s$ برای مواد $k$ در دوره زمانی $i$	$CapS_{ksi}$
تقاضا	
تقاضای خرده‌فروش $r$ از محصول $p$ در دوره زمانی $i$	$D_{rpi}$
تقاضای تولیدکننده $m$ از مواد اولیه $k$ از تأمین‌کننده $s$ در دوره زمانی $i$	$De_{mski}$
هزینه زیست‌محیطی	
هزینه هر واحد آثار زیست‌محیطی سیستم حمل‌ونقل بین تسهیلات با وسیله نقلیه $v$ در دوره زمانی $i$	$ev_{vi}$
هزینه هر واحد آثار زیست‌محیطی به‌وجودآمده به‌وسیله تولیدکننده $m$ در دوره زمانی $i$	$em_{mi}$

$eh_{si}$	هزینه هر واحد آثار زیست محیطی به وجود آمده به وسیله تأمین کننده $s$ در دوره زمانی $i$
<b>سایر پارامترها</b>	
$RS_{kpi}$	ضریب مصرف مواد اولیه $k$ در محصول $p$ در دوره زمانی $i$
$FR_{pi}$	ضریب فروش از دست رفته برای محصول $p$ در دوره زمانی $i$
$BigM$	یک عدد بزرگ
$YY_{mi}$	روزهای از دست رفته به علت خسارت های تولید در مرکز تولید $m$ در دوره زمانی $i$
$SY_{si}$	روزهای از دست رفته به علت خسارت های تأمین در مرکز تأمین کننده $s$ در دوره زمانی $i$
$ExpDate_p$	طول عمر محصول $p$
$LM_m$	حداقل نیروی در دسترس برای تولید کننده $m$
$MM_m$	حداکثر نیروی در دسترس برای تولید کننده $m$
$LW_s$	حداقل نیروی در دسترس برای تأمین کننده $s$
$AM_s$	حداکثر نیروی در دسترس برای تأمین کننده $s$
<b>متغیرهای تصمیم</b>	
$XP_{pmij}$	مقدار محصول تولید شده $p$ توسط تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$ برای تحقق تقاضا در دوره زمانی $j$
$XI_{pmi}$	مقدار محصول ذخیره شده $p$ توسط تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$ تا $i+1$
$XJ_{pmi}$	میزان محصول تولید شده $p$ توسط تولید کننده $m$ که در دوره زمانی $i$ فاسد می شود (مقدار تولید شده در دوره $i-l$ و تا دوره $i$ استفاده نمی شود و شامل دوره $i$ است)
$X_{pmi}$	کل تولید محصول $p$ توسط تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$
$XS_{ksmi}$	مقدار مواد اولیه $k$ که از تأمین کننده $s$ به تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$ منتقل می شود.
$XL_{pmri}$	مقدار محصول $p$ که از تولید کننده $m$ به خرده فروش $r$ در دوره زمانی $i$ منتقل می شود.
$XW_{ksi}$	مقدار کل مواد اولیه $k$ که تأمین کننده $s$ در دوره زمانی $i$ تولید می کند.
$B_{pi}$	میزان کمبود محصول $p$ در دوره زمانی $i$
$R_{mi}$	تعداد نیروی استخدام شده توسط تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$
$Q_{si}$	تعداد نیروی استخدام شده توسط تأمین کننده $s$ در دوره زمانی $i$
$SMF_{mi}$	تعداد نیروی اخراج شده توسط تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$
$SMJ_{si}$	تعداد نیروی اخراج شده توسط تأمین کننده $s$ در دوره زمانی $i$
$NM_{mi}$	تعداد نیروی اختصاص داده شده به تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$
$NS_{si}$	تعداد نیروی اختصاص داده شده به تأمین کننده $s$ در دوره زمانی $i$
$Y_{mpi}$	اگر تولید کننده $m$ برای تولید محصول $p$ در دوره زمانی $i$ راه اندازی شود، ۱؛ در غیر این صورت، صفر.
$SPR_{pri}$	سطح موجودی از محصول $p$ در خرده فروش $r$ در دوره زمانی $i$
$SR_{pmi}$	اگر خرده فروش $r$ به تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$ تخصیص داده شود، ۱؛ در غیر این صورت، صفر.
$SS_{smi}$	اگر تأمین کننده $s$ به تولید کننده $m$ در دوره زمانی $i$ تخصیص داده شود، ۱؛ در غیر این صورت، صفر.

معادله شماره ۱، نشان‌دهنده تابع هدف مسئله است که به حداقل رساندن کل هزینه شبکه پیشنهادی است. عبارت اول، نشان‌دهنده هزینه راه‌اندازی؛ عبارت دوم، هزینه حمل‌ونقل است؛ عبارت سوم، هزینه نگهداری موجودی کالا؛ عبارت چهارم، هزینه خرید؛ عبارت پنجم، هزینه تولید؛ عبارت ششم، هزینه کمبود؛ عبارت هفتم، هزینه فروش از دست‌رفته؛ عبارت هشتم، هزینه محصولات فاسدشده، عبارت‌های نهم و دهم، هزینه‌های اجتماعی (هزینه‌های اجتماعی مربوط به استخدام، اخراج، حقوق و دستمزد و روزهای کاری از دست‌رفته) برای تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان و عبارت یازدهم، هزینه‌های زیست‌محیطی (هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط با تولید و حمل‌ونقل مواد و محصولات) برای تولیدکنندگان و تأمین‌کنندگان است.

معادله شماره ۲، مقدار محصول ذخیره‌شده را پس از تمام تقاضاهای دوره  $i$  موجود تعریف می‌کند. این مقدار، مقدار تولیدشده در دوره‌های قبل را برای برآوردن تقاضا در دوره‌های  $i + 1$  تا  $i + \text{ExpDate}(p)$  به‌علاوه تولید فاسدشده در نظر می‌گیرد. معادله شماره ۳، این موضوع را بیان می‌کند که مقدار کل تولید مواد اولیه، برابر با مقدار کل مواد اولیه ارسالی به تولیدکننده است. معادلات شماره ۴ و ۵، نشان می‌دهد مقدار محصول تولیدشده در دوره  $i$  برای تحقق تقاضا در دوره‌های  $1$  تا  $i + \text{ExpDate}(p)$  استفاده می‌شود یا از دست می‌رود. معادله شماره ۶، بیان می‌کند که تقاضا در دوره  $j$  باید از تولید در دوره‌های  $j - \text{ExpDate}(p)$  تا  $n$  برآورده شود یا در طول افق زمانی برآورده نمی‌شود (مورد  $(j > 0, XP_{mp(n+1)} \geq 0)$ ).

معادله شماره ۷، نشان می‌دهد میزان کل تولید نمی‌تواند از ظرفیت تولید بیشتر باشد. معادله شماره ۸، سطح موجودی محصول را در خرده‌فروشی‌ها نشان می‌دهد. معادله شماره ۹، نشان می‌دهد ارسال مواد اولیه، زمانی از تأمین‌کنندگان انجام می‌شود که تأمین‌کننده به تولیدکننده تخصیص داده شود. معادلات شماره ۱۱ و ۱۲، معادلات کنترل موجودی را نشان می‌دهد. معادله شماره ۱۳، نشان می‌دهد میزان مواد ارسالی به تولیدکننده نمی‌تواند بیشتر از تقاضای تولیدکننده و میزان مصرف مواد در محصول باشد. معادلات شماره ۱۴ و ۱۵، تعداد استخدام‌ها به‌وسیله تولیدکننده را نشان می‌دهد. معادلات شماره ۱۶ و ۱۷، تعداد استخدام‌ها به‌وسیله تأمین‌کننده را نشان می‌دهد. معادلات شماره ۱۸ و ۱۹، تعداد کارگران را در دوره‌های زمانی متوالی بین زمان تولید و ارسال به تأمین‌کننده نشان می‌دهد.

معادله شماره ۲۰، تعادل باینری راه‌اندازی تولید را نشان می‌دهد. معادله شماره ۲۱، ارتباط میزان محصول ارسالی به خرده‌فروش را به‌علاوه تقاضای خرده‌فروش نشان می‌دهد. معادله شماره ۲۲، نشان می‌دهد میزان کل تولید از میزان محصول ارسالی به خرده‌فروش بیشتر است. معادله شماره ۲۳، نشان می‌دهد، میزان مواد ارسالی از تأمین‌کننده به تولیدکننده، کمتر از ظرفیت تأمین‌کننده است. معادله شماره ۲۴، نشان می‌دهد میزان مواد ارسالی از تأمین‌کننده به تولیدکننده، برابر میزان کل تولید در ضریب مصرف مواد در صورت راه‌اندازی تولید است. معادله شماره ۲۵، نشان‌دهنده محدودیت خروج به ترتیب ورود است. این معادله اطمینان می‌دهد که تقاضا ابتدا با قدیمی‌ترین کالاهای موجودی برآورده می‌شود و به دنبال آن، با کالاهای مد نظر برطرف می‌شود. این محدودیت اطمینان می‌دهد که  $XP_{pmzi}$  و  $XJ_{pmj}$  نمی‌توانند به‌طور هم‌زمان مثبت باشند. مقدار مثبت برای  $XJ_{pmj}$  بدین معنی است که محصولی در مدت‌زمان  $j - \text{ExpDate}(p)$  تولید شده و در طول عمر آن استفاده نشده است. مقدار مثبت  $XP_{pmzi}$  نشان‌دهنده محصولی است که پس از مدت‌زمان  $j - \text{ExpDate}(p)$  تولید می‌شود (مدت‌زمانی که یک مورد کالای فاسد در  $j$  تولید شده است) و برای تحقق تقاضا تا دوره  $j$  استفاده می‌شود. اگر  $XJ_{pmj} > 0$  باشد، تقاضا می‌تواند با کالای فاسدشده‌ای ارضا شود که عمر مفید آن در  $j$  به پایان می‌رسد.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \left( \sum_p \sum_m \sum_i OCF_{mp} \cdot X_{pmi} \right) \tag{۱} \\
 & + \left( \sum_k \sum_s \sum_m \sum_v \sum_p \sum_i TCI_{ksmvi} \cdot XS_{ksmi} \cdot RS_{kpi} + \sum_m \sum_r \sum_p \sum_v \sum_i TCJ_{mrpvi} \cdot XL_{pmri} \right) \\
 & + \left( \sum_p \sum_m \sum_i HNF_{pm} \cdot XI_{pmi} + \sum_p \sum_r \sum_i HNJ_{pr} \cdot SPR_{pri} \right) \\
 & + \left( \sum_p \sum_m \sum_r \sum_i PC_{pmri} \cdot XL_{pmri} + \sum_k \sum_s \sum_m \sum_p \sum_i PCR_{ksmi} \cdot XS_{ksmi} \cdot RS_{kpi} \right) \\
 & + \left( \sum_p \sum_m \sum_i PMC_{pmi} \cdot X_{pmi} + \sum_k \sum_s \sum_m \sum_i PKC_{ksi} \cdot XS_{ksmi} \right) + \left( \sum_p \sum_i PSC_{pi} \cdot B_{pi} \right) \\
 & + \left( \left( \sum_p \sum_m \sum_i LSC_{pmi} \cdot X_{pmi} \cdot FR_{pi} \right) + \left( \sum_p \sum_m \sum_i CSC_{pmi} \cdot XJ_{pmi} \right) \right) \\
 & + \left( \sum_m \sum_i LLC_{mi} \cdot R_{mi} + \sum_m \sum_i LBC_{mi} \cdot SMF_{mi} + \sum_m \sum_i HIC_{mi} \cdot NM_{mi} \right. \\
 & + \sum_m \sum_p \sum_i LDC_{mi} \cdot Y_{mpi} \cdot YY_{mi} + \sum_s \sum_i LS_{si} \cdot Q_{si} + \sum_s \sum_i LBS_{si} \cdot SMJ_{si} \\
 & \left. + \sum_s \sum_i HIS_{si} \cdot NS_{si} + \sum_s \sum_m \sum_i LDS_{si} \cdot SS_{smi} \cdot SY_{si} \right) \\
 & + \left( \sum_k \sum_s \sum_m \sum_p \sum_i eh_{si} \cdot XW_{ksi} \cdot SS_{smi} \cdot RS_{kpi} + \sum_p \sum_m \sum_r \sum_v \sum_i ev_{vi} \cdot XL_{pmri} \cdot SR_{rmi} \right. \\
 & \left. + \sum_s \sum_m \sum_v \sum_i ev_{vi} \cdot XS_{ksmi} \cdot SS_{smi} + \sum_p \sum_m \sum_i em_{mi} \cdot Y_{mpi} \cdot X_{pmi} \right)
 \end{aligned}$$

Subject to:

$$XI_{pmi} = \sum_{j=1}^i \sum_{z=i+1}^{\min(i+ExpDate(p),n)} XP_{pmzj} + \sum_{j=i+1}^{\min(i+ExpDate(p),n)} XJ_{pmj} \quad \forall p, m, i \tag{۲}$$

$$\sum_k \sum_s \sum_i XW_{ksi} = \sum_k \sum_s \sum_i XS_{ksmi} \quad \forall m \tag{۳}$$

$$X_{pmi} = \sum_{j=1}^{n+1} XP_{pmij} \quad \forall p, m, i \in \{n - ExpDate(p) + 1, \dots, n\} \tag{۵}$$

$$\sum_r^R D_{rpi} = \sum_{i=\max(1, j-ExpDate(p))}^{n+1} XP_{pmij} \quad \forall p, m, j \tag{۶}$$

$$CapM_{mpi} \geq X_{pmi} \quad \forall m, p, i \tag{۷}$$

$$SPR_{pri} = \sum_{m=1}^m XL_{pmri} + SPR_{pr(i-1)} - D_{rpi} \quad \forall p, r, i \tag{۸}$$

$$\sum_{k=1}^k XS_{ksmi} \leq BigM \cdot SS_{smi} \quad \forall s, m, i \tag{۹}$$

$$\sum_{r=1}^r XL_{pmri} \leq BigM \cdot Y_{mpi} \quad \forall p, m, i \tag{۱۰}$$

$$\sum_r^R D_{rpi} = X_{pmi} + XI_{pm(i-1)} - B_{p(i-1)} - XI_{pmi} + B_{pi} \quad \forall p, m, i \tag{۱۱}$$

$$D_{rpi} \cdot Y_{mpi} = X_{I_{pm}(i-1)} - B_{p(i-1)} \quad \forall p, m, r, i \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{S_{ksmj}} \leq De_{mksi} \cdot RS_{kpi} \quad \forall p, m, k, s, i \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n NM_{mi} \leq MM_m \quad \forall m \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n NM_{mi} \geq LM_m \quad \forall m \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n NS_{si} \leq AM_s \quad \forall s \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^n NS_{si} \geq LW_s \quad \forall s \quad (17)$$

$$NM_{m(i-1)} + R_{mi} - SMF_{mi} = NM_{mi} \quad \forall m, i \quad (18)$$

$$NS_{s(i-1)} + Q_{si} - SMJ_{si} = NS_{si} \quad \forall s, i \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^m Y_{mpi} \leq 1 \quad \forall p, i \quad (20)$$

$$XL_{pmri} \leq D_{rpi} \cdot SR_{rmi} \quad \forall p, m, r, i \quad (21)$$

$$\sum_{m=1}^m X_{pmi} \geq \sum_{m=1}^m \sum_{r=1}^r XL_{pmri} \quad \forall p, i \quad (22)$$

$$\sum_{m=1}^m X_{S_{ksmi}} \leq CAPS_{ksi} \quad \forall k, s, i \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S X_{S_{k,s,m,i}} = \sum_{k=1}^K X_{pmi} RS_{kpi} Y_{mpi} \quad \forall m, p, i \quad (24)$$

$$XP_{pmzi} \cdot X_{J_{pmj}} = 0 \quad \forall j \quad z > j - ExpDate(p), i \leq j, m, p \quad (25)$$

### ۲,۳ خطی‌سازی مدل

ضرب یک متغیر باینری و یک متغیر پیوسته در تابع هدف و محدودیت‌ها به غیرخطی بودن مدل پیشنهادی منجر شده است. برای یافتن راه حلی برای این مسئله، با استفاده از تغییر متغیر، اول، مدل پیشنهادی به یک مدل خطی تبدیل می‌شود. محدودیت خطی‌سازی برای هر متغیر به شرح ذیل تعریف شده است و در اینجا،  $\varphi = X_1 * X_2$  و  $BigM$  مساوی با حد بالای  $X_2$  است (قلی‌زاده<sup>۳۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).

$$\varphi \leq X_1 \quad (26)$$

$$\varphi \leq BigM * X_2 \quad (27)$$

$$\varphi \geq X_2 - (1 - X_1) * BigM \quad (28)$$

به طور مثال، معادله  $\sum_p \sum_m \sum_i em_{mi} \cdot Y_{mpi} \cdot X_{pmi}$  در تابع هدف به صورت ذیل خطی می شود:

$$\pi_{mpi} \leq X_{pmi} \quad (29)$$

$$\pi_{mpi} \leq BigM \cdot Y_{mpi} \quad (30)$$

$$\pi_{mpi} \geq X_{pmi} - (1 - Y_{mpi}) \cdot BigM \quad (31)$$

در اینجا، مقدار  $BigM$  برای متغیر  $X_{pmi}$  برابر با حد پایین مقدار تقاضاست. همچنین، برای دیگر متغیرهای تصمیم مانند  $XS_{ksmi}$  و  $XL_{pmri}$  و  $XW_{ksi}$  در تابع هدف،  $BigM$  برابر با حد بالای میزان تقاضاست. همانگونه که در مدل نشان داده شده است، محدودیت شماره ۲۵ به علت ضرب دو متغیر پیوسته غیرخطی است. برای خطی کردن آن از روش سه مرحله ای ذیل استفاده می شود (ویدال و گوتسچالک<sup>۳۹</sup>، ۲۰۰۱؛ سعیدی مهرآباد و اعظمی، ۲۰۱۷).

گام (۱) برای هر متغیر پیوسته معادله شماره ۲۵، حد بالا و پایین تعیین می شود:

$$0 \leq XJ_{pmj} \leq D_{rpi} * FR_{pi} \quad \forall p, m, i, r, j \quad (32)$$

$$D_{rpi} \leq XP_{pmzi} \leq CapM_{mpi} \quad \forall i, z, m, p, r \quad (33)$$

گام (۲) ضرب دو متغیر پیوسته برابر با یک متغیر پیوسته جدید است که به جای ضرب دو متغیر پیوسته در مدل قرار داده می شود:

$$XP_{pmzi} \cdot XJ_{pmj} = \varphi_{pmzij} \quad \forall j \in t, z > j - ExpDate(p), i \leq j, m, p \quad (34)$$

گام (۳) دو محدودیت جدید به جای محدودیت شماره ۲۵ در مدل قرار داده می شود:

$$0 \leq \varphi_{pmzij} \leq D_{rpi} * FR_{pi} * XP_{pmzi} \quad \forall j \in t, z > j - ExpDate(p), i \leq j, m, p \quad (35)$$

$$D_{rpi} * XJ_{pmj} \leq \varphi_{pmzij} \leq CapM_{mpi} * XJ_{pmj} \quad \forall j \in t, z > j - ExpDate(p), i \leq j, m, p \quad (36)$$



### ۳.۴ بهینه‌سازی استوار

در بخش حاضر، به علت عدم قطعیت پارامترهای تقاضا، ظرفیت تسهیلات و هزینه‌های اقتصادی در مدل پیشنهادی، از بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. در مدل بهینه‌سازی استوار، دو نوع متغیر وجود دارد: متغیرهای طراحی و متغیرهای کنترل. درباره متغیرهای طراحی پیش از تحقق پارامترهای احتمالی تصمیم گرفته شده است. متغیرهای کنترل، زمانی تنظیم می‌شود که رخداد خاصی از پارامترهای احتمالی تحقق یابد. همچنین، محدودیت‌های مدل استوار، در بردارنده محدودیت‌های ساختاری و محدودیت‌های کنترل است. محدودیت‌های ساختاری، پارامترها و متغیرهای قطعی و محدودیت‌های کنترل، پارامترها و یا متغیرهای غیرقطعی دارد. مبنای مدل استوار استفاده شده در این پژوهش براساس مطالعات مولوی<sup>۴۰</sup> و همکاران (۱۹۹۵) است که به صورت ذیل شرح داده شده است (قلی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸):

مدل بهینه‌سازی خطی، شامل معادلات (۳۷)–(۴۰) را در نظر بگیرید:

$$\text{Min } \zeta = c^T X + d^T Y_s \quad (37)$$

Subject to:

$$AX = b \quad (38)$$

$$B_s X + C_s Y_s = e_s \quad \forall s \quad (39)$$

$$X; Y_s \geq 0 \quad (40)$$

در مدل مذکور،  $X$  بردار متغیرهای طراحی و  $Y$  شامل متغیرهای کنترل است.  $S$  نشان‌دهنده مجموعه سناریوهای موجود است و احتمال وقوع هر سناریو برابر با  $p_s$  در نظر گرفته می‌شود؛ به گونه‌ای که  $\sum_s P_s = 1$  است. محدودیت‌های (۳۸) و (۳۹) به ترتیب، نشان‌دهنده محدودیت‌های ساختاری و کنترل مسئله است.  $\delta_s$  بردار متغیرهای انحراف است و میزان نشدنی بودن محدودیت‌های کنترل تحت سناریوی  $s$  را اندازه می‌گیرد. مدل ریاضی استوار برای مدل ریاضی، شامل (۳۷)–(۴۰) به صورت (۴۱)–(۴۴) بیان می‌شود.

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \quad (41)$$

Subject to:

$$AX = b \quad (42)$$

$$B_s X + C_s Y_s + \delta_s = e_s \quad \forall s \in S \quad (43)$$

$$X; Y_s \geq 0 \quad (44)$$

در مدل مذکور، عبارت  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  میزان استواری جواب و عبارت  $p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$  میزان استواری مدل را اندازه‌گیری می‌کند. برای این عبارت می‌توان توابع مختلفی تعریف کرد؛ برای مثال، معمولاً  $p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$  برابر با  $\sum_s P_s \delta_s$  در نظر گرفته می‌شود. مولوی و همکاران (۱۹۹۵)، عبارت  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  را براساس رابطه شماره (۴۵) برابر با مجموع ارزش انتظاری، به علاوه  $\lambda$  (مقداری ثابت) در واریانس تابع هدف، در نظر گرفتند.

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in S} P_s \zeta_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s \left( \zeta_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} \zeta_{s'} \right)^2 \quad (45)$$

با جایگزینی  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  در تابع هدف، یک مدل برنامه‌ریزی خطی درجه دوم حاصل می‌شود. یو<sup>۴۱</sup> و لی<sup>۴۲</sup> (۲۰۰۰) پیشنهاد کردند عبارت  $\sum_{s \in S} P_s \left( \zeta_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} \zeta_{s'} \right)^2$  را که موجب افزایش زمان حل مسئله می‌شود، با عبارت شامل قدر مطلق می‌توان جایگزین کرد؛ بنابراین، استواری حل مسئله به صورت ذیل تغییر می‌کند:

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in S} P_s \zeta_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s \left| \zeta_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} \zeta_{s'} \right| \quad (46)$$

تابع هدف (۴۶)، یک معادله غیرخطی است و یو و لی (۲۰۰۰) اثبات کردند که حداقل‌سازی  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  معادل مدل برنامه‌ریزی خطی، شامل معادلات (۴۷)–(۴۹) به شرح ذیل است:

$$\text{Min} \sum_{s \in S} P_s \zeta_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s \left( \zeta_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} \zeta_{s'} + 2\theta_s \right) \quad (47)$$

$$\zeta_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} \zeta_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (48)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (49)$$

در نتیجه، مدل بهینه‌سازی استوار (۴۱)–(۴۴) به مدل ذیل تبدیل خواهد شد:

$$\text{Min} \sum_{s \in S} P_s \zeta_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s \left( \zeta_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} \zeta_{s'} + 2\theta_s \right) + \omega \sum_{s \in S} P_s \delta_s \quad (50)$$

S.t: (۴۲)–(۴۴) , (۴۸) و (۴۹)

بنابراین، مدل بهینه‌سازی استوار استفاده‌شده در ذیل نشان داده شده است (قلی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۱):

$$\text{Min } ZF = \sum_s P_s OBJ_s + \lambda \sum_s P_s \left( OBJ_s - \sum_{s'} P_{s'} OBJ_{s'} + 2\theta_s \right) + \omega \sum_s P_s \delta_s \quad (51)$$

S.t:

$$OBJ_s - \sum_{s'} P_{s'} OBJ_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (52)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (53)$$

and constraint (2)-(25)

در اینجا،  $\lambda$  وزن ریسک و  $\omega$  وزن غیرشدنی است و تصمیم‌گیرنده، آن را به روش تجربی تعیین می‌کند.  $P_s$  احتمال سناریوی  $s$  و  $P_{s'}$  احتمال سناریوی  $s'$  که  $s' \in S$  و  $\theta_s$  نیز متغیر خطی‌سازی تحت سناریوی  $s$  است. در معادله شماره ۵۱، عبارت‌های اول و دوم، نشان‌دهنده ارزش متوسط و واریانس تابع هدف و عبارت سوم، اندازه‌گیری استواری مدل از نظر ارزش غیرشدنی محدودیت‌های کنترل تحت هر سناریو است. محدودیت شماره ۵۲، محدودیت کمکی اضافه‌شده به مدل برای تبدیل تابع هدف غیرخطی به خطی و محدودیت شماره ۵۳، متغیرهای غیرمنفی است.

### ۴.۳ روش ابتکاری

برای حل مدل توسعه‌یافته به‌طور کارآمد از روشی اکتشافی برای خطی‌سازی مدل استفاده می‌شود. زمان محاسباتی برای هر مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، با توجه به افزایش متغیرها و حضور داده‌ها افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، در طول زمان، حتی در برخی موارد، هیچ پاسخ مطلوبی وجود ندارد؛ بنابراین، روشی اکتشافی مبتنی بر ساده‌کردن<sup>۴۴</sup> متغیر باینری پیشنهاد شده است. ابتدا، متغیر باینری را بزرگ‌تر از صفر در نظر می‌گیریم و مدل بهینه‌سازی را حل می‌کنیم. از جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده، تمامی متغیرهای باینری غیرصفر را در نظر می‌گیریم و به‌عنوان محدودیت جدیدی به مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط اضافه و مدل بهینه‌سازی را حل می‌کنیم. یکی از مزایای این روش، کاهش زمان حل مسئله است (قلی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۰).

مراحل این روش به شرح ذیل است:

**مرحله اول:** محدودیت صفر و یک را با تبدیل متغیرهای باینری مسئله پیشنهادی به یک متغیر مثبت پیوسته

آزاد<sup>۴۵</sup> کنید؛

**مرحله دوم:** مدل آزادشده را حل کنید؛

**مرحله سوم:** تمام مقادیر غیرصفر را برای متغیر آزادشده گزارش کنید؛

**مرحله چهارم:** هر مقدار غیرصفر از متغیرهای آزاد شده را روی ۱ تنظیم کنید و آنها را به عنوان محدودیت در مدل اصلی MILP قرار دهید.

**مرحله پنجم:** مدل را دوباره حل کنید.  
شبه کد الگوریتم پیشنهادی در ذیل آمده است:

---

**ورودی:** پارامترهای مدل، شرط خاتمه

**شرط خاتمه:** تمامی عناصر مربوط به متغیر باینری مد نظر برابر با صفر یا یک شده باشند.

**تا زمان رسیدن به شرط خاتمه، آغاز کن**

مسئله را از قید صفر و یک (باینری) آزاد کنید.

مدل آزاد شده را حل کنید.

**اگر**

مقدار متغیر باینری برابر صفر شد؛ در مرحله بعدی، آن را به صورت یک پارامتر برابر با صفر قرار دهید.

**در غیر این صورت، اگر**

مقدار متغیر باینری برابر با یک شد، در مرحله بعدی، آن را به صورت یک پارامتر برابر با یک قرار دهید.

**در غیر این صورت**

متغیر به مرحله بعد منتقل شود.

**پایان اگر**

**پایان حلقه**

---

#### ۴. مطالعه کاربردی و یافته‌های پژوهش

در بخش حاضر، برای ارزیابی مدل توسعه داده شده، آزمایش‌های عددی مختلفی براساس یک مطالعه موردی واقعی زنجیره تأمین لبنیات در نظر گرفته می‌شود. منبع داده‌های استفاده شده در مطالعه حاضر، شرکت پاک است. به علت سیاست‌های خاص شرکت (افشا نکردن داده) بعد از جمع‌آوری داده‌ها از بخش‌های مختلف زنجیره و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده، توزیع رفتار داده‌ها با نرم‌افزار آماری استخراج شد که در جدول شماره ۳ آمده است؛ سپس مدل حل شد. براساس آزمایش‌های انجام شده برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نتایج، نشان‌دهنده اعتبار مدل است که به توسعه راه حلی منجر شده است که می‌تواند به سایر صنایع نیز گسترش یابد تا از تصمیم‌گیری مدیران با روش ابتکاری پشتیبانی کند.

جدول ۳- منابع تولید داده‌های تصادفی

توزیع تصادفی متناظر	پارامتر	توزیع تصادفی متناظر	پارامتر
Uniform (15, 30)	$LBS_{si}$	Uniform (300,650)	$TCI_{ksmvi}$
Uniform (20, 50)	$HIS_{si}$	Uniform (20,100)	$TCJ_{mrpvi}$
Uniform (15,30)	$LDS_{si}$	Uniform (50,150)	$OCF_{mp}$
Uniform (50,150)	$ev_{vi}$	Uniform (30,120)	$HNF_{pm}$
Uniform (10,50)	$em_{mi}$	Uniform (20,100)	$HNJ_{pr}$
Uniform (10,50)	$eh_{si}$	Uniform (150,350)	$PC_{pmri}$
Uniform (200,10000)	$D_{rpi}$	Uniform (100,350)	$PCR_{ksmi}$
Uniform (200,8000)	$De_{mski}$	Uniform (3,8)	$PMC_{pmi}$
10000000	$BigM$	Uniform (100,300)	$PKC_{ksi}$
Uniform (10,50)	$YY_{mi}$	Uniform (100,350)	$PSC_{pi}$
Uniform (10, 70)	$SY_{si}$	Uniform (50,150)	$LSC_{pmi}$
Uniform (2, 5)	$ExpDate_p$	Uniform (15,100)	$CSC_{pmi}$
Uniform (5,15)	$LM_m$	Uniform (1000,15000)	$CapM_{mpi}$
Uniform (10,50)	$MM_m$	Uniform (500,12000)	$CapS_{ksi}$
Uniform (5,15)	$LW_s$	Uniform (10,150)	$LLC_{mi}$
Uniform (10,50)	$AM_s$	Uniform (20,150)	$LBC_{mi}$
Uniform (0.1,0.5)	$RS_{kpi}$	Uniform (20,100)	$HIC_{mi}$
Uniform (0.05,0.7)	$FR_{pi}$	Uniform (10,60)	$LDC_{mi}$
		Uniform (20,50)	$LS_{si}$

مدل ریاضی پیشنهادی در نرم‌افزار گمز ۲۰۱۷ کدگذاری شد. هر مسئلهٔ آزمون<sup>۴۶</sup> با استفاده از مدل توسعه‌یافته ابتکاری و استوار با توجه به پارامترهای مبتنی بر آزمایش‌های عدم قطعیت برای چهار آزمایش و توزیع‌های تصادفی حل شد.

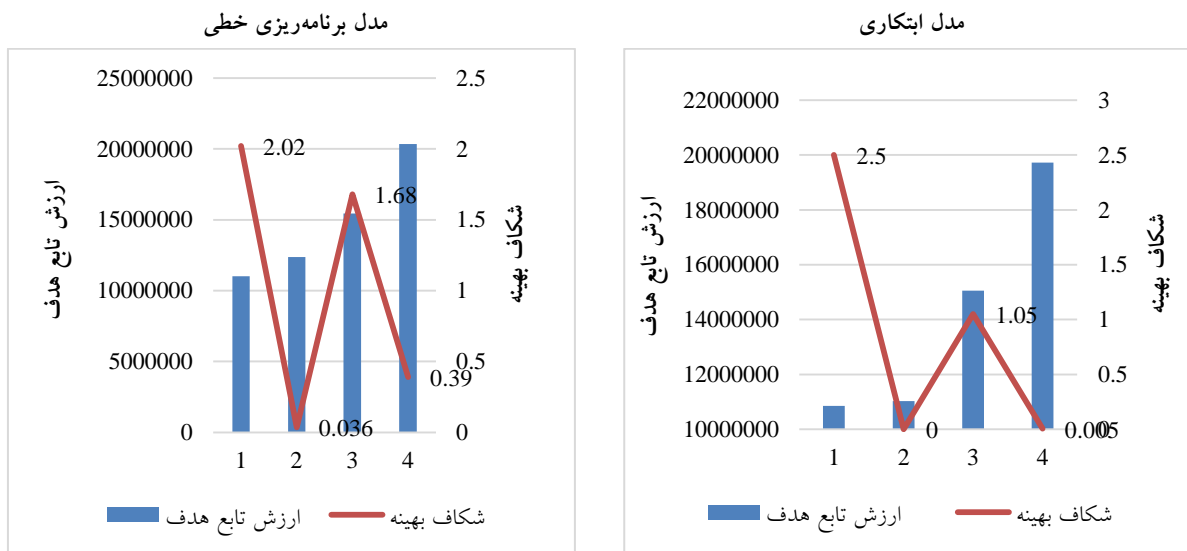
برای نشان‌دادن کارایی روش پیشنهادی، چهار ساینز مختلف مسئله، که در جدول شماره ۴ آمده است، در نظر گرفته شد. مدل‌ها با ۳ روش حل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و ابتکاری مقایسه شده که در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. مدل غیرخطی با حل‌کنندهٔ دایکوپت<sup>۴۷</sup> و مدل‌های خطی و ابتکاری با حل‌کنندهٔ سیپلکس<sup>۴۸</sup> در گمز حل شده است. براساس نتایج جدول شماره ۵، روش ابتکاری نسبت به دو روش دیگر، عملکرد بهتری داشته است.

جدول ۴- اندازه مسئله

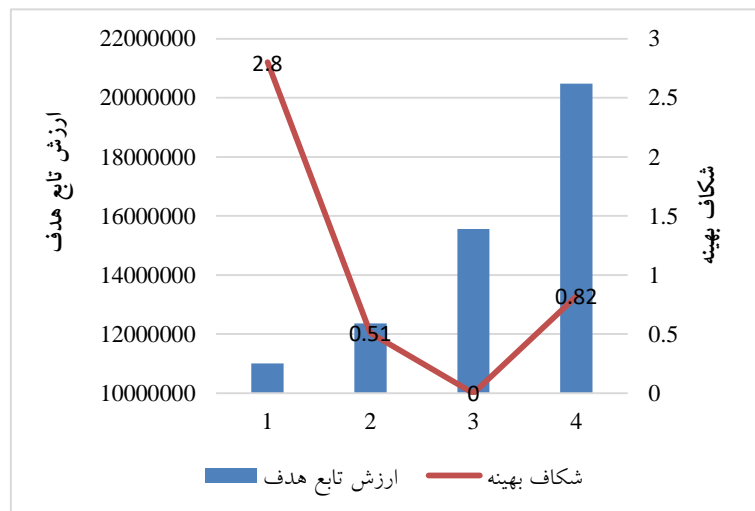
شماره مسئله	اندازه مسئله
۱	$ P  \times  V  \times  K  \times  S  \times  R  \times  M  \times  T  = 3 \times 3 \times 1 \times 2 \times 3 \times 1 \times 5$
۲	$ P  \times  V  \times  K  \times  S  \times  R  \times  M  \times  T  = 6 \times 6 \times 2 \times 4 \times 3 \times 1 \times 8$
۳	$ P  \times  V  \times  K  \times  S  \times  R  \times  M  \times  T  = 8 \times 10 \times 3 \times 6 \times 3 \times 2 \times 10$
۴	$ P  \times  V  \times  K  \times  S  \times  R  \times  M  \times  T  = 10 \times 12 \times 5 \times 10 \times 3 \times 5 \times 12$

جدول ۵- مقایسه روش‌های مختلف حل در حالت قطعیت و عدم قطعیت

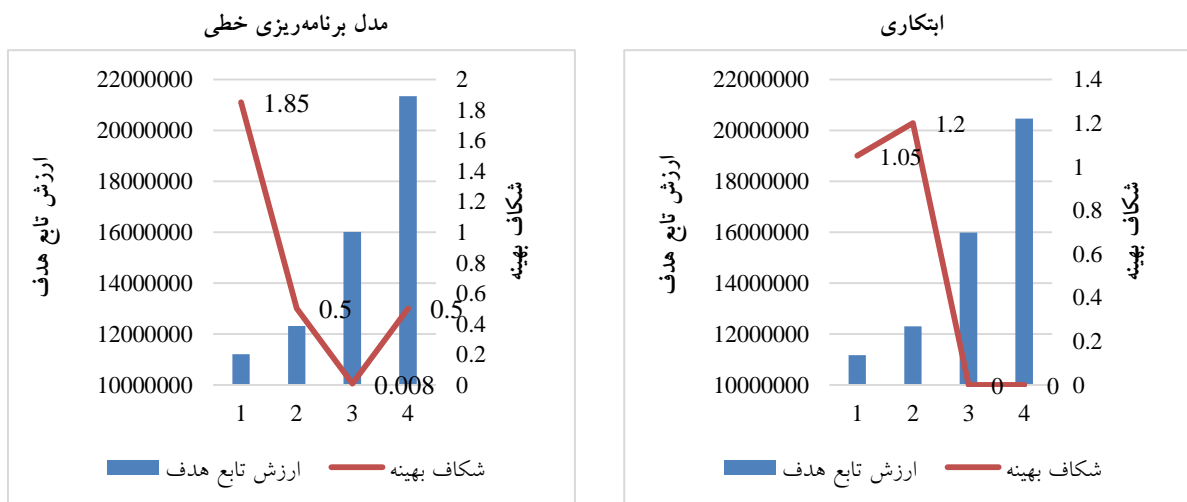
روش	شماره مسئله	ابتکاری			برنامه‌ریزی خطی			برنامه‌ریزی غیرخطی					
		درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی	درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی	درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی			
۱	۱	۱/۵	۰:۰۱:۳۰	۱۱۱۶۵:۴۷	۱/۵۶	۰:۰۲:۰۰	۱۱۰:۵۴۱۳	۲/۸	۰:۰۴:۵۶	۱۱۲۱۳۲۴۵			
											درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی
											استوار	زمان	استوار
											زمان	زمان	زمان
۲	۲	۰	۰:۰۲:۴۶	۱۳۳۰:۲۱۴	۰/۵	۰:۰۲:۵۰	۱۲۲۶۳۲۱۶	۱/۴	۰:۰۵:۰۰	۱۲۷۵۳۲۴۰			
											درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی
											استوار	زمان	استوار
											زمان	زمان	زمان
۳	۳	۰	۰:۰۲:۵۴	۱۵۹۸۳۵۴۰	۰/۰۸	۰:۰۳:۲۰	۱۵۴۳۲۵۰۷	۰/۹۴	۰:۰۵:۳۴	۱۶۳۵۲۴۸۴			
											درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی
											استوار	زمان	استوار
											زمان	زمان	زمان
۴	۴	۰	۰:۰۴:۴۲	۲۰۴۵۳۴۹۰	۱/۳۶	۰:۰۵:۰۶	۲۰۳۳۷۸۹۰	۰/۳۹	۰:۰۷:۴۱	۲۱۶۳۵۷۴۵			
											درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی
											استوار	زمان	استوار
											زمان	زمان	زمان
۵	۵	۰	۰:۰۳:۴۶	۱۳۳۰:۲۱۴	۰/۵	۰:۰۲:۵۰	۱۲۲۶۳۲۱۶	۱/۴	۰:۰۵:۰۰	۱۲۷۵۳۲۴۰			
											درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی
											استوار	زمان	استوار
											زمان	زمان	زمان
۶	۶	۰	۰:۰۳:۴۶	۱۳۳۰:۲۱۴	۰/۵	۰:۰۲:۵۰	۱۲۲۶۳۲۱۶	۱/۴	۰:۰۵:۰۰	۱۲۷۵۳۲۴۰			
											درصد شکاف بهینه	زمان	قطعی
											استوار	زمان	استوار
											زمان	زمان	زمان



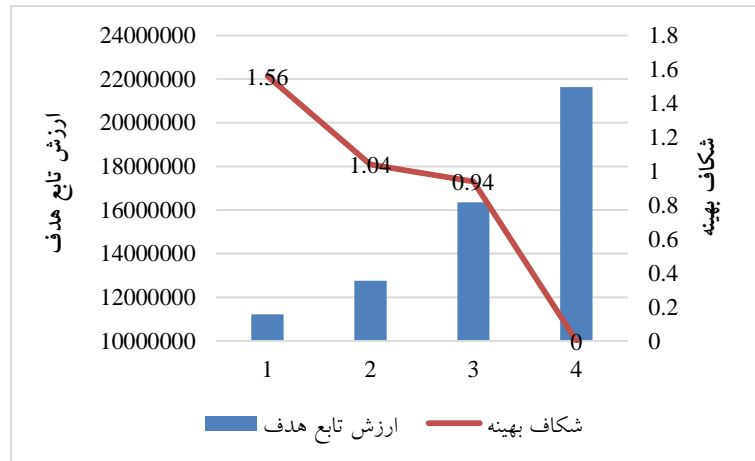
مدل برنامه‌ریزی غیرخطی



شکل ۲- مقایسه سه روش حل در شرایط قطعیت

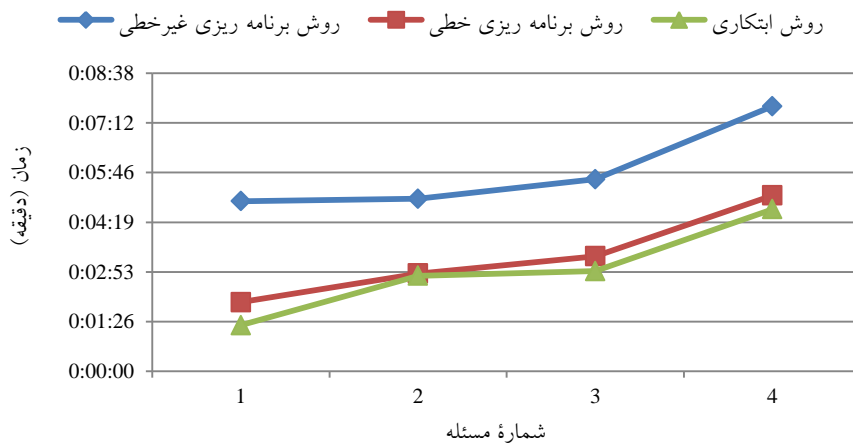


مدل برنامه‌ریزی غیرخطی



شکل ۳- مقایسه سه روش حل در شرایط عدم قطعیت

همانگونه که از جدول شماره ۵ و شکل‌های شماره ۲ و ۳ مشخص است، ارزش تابع هدف با افزایش اندازه مسئله افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ارزش تابع هدف در شرایط قطعی بسیار نزدیک به وضعیت استوار است و این موضوع، عملکرد مناسب مدل را در برخورد با عدم قطعیت نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن خروجی‌های ۳ مدل، عملکرد رویکرد ابتکاری از نظر ارزش تابع هدف و زمان حل مسئله بهتر است. با توجه به شکل شماره ۴، در روش ابتکاری پیشنهادی در حالت عدم قطعیت با زمان کمتری به نتیجه دلخواه دست می‌یابیم که نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش ابتکاری پیشنهادی است.



شکل ۴- مقایسه زمان حل برای مسئله پیشنهادی در حالت استوار

با توجه به اینکه مدل، دربردارنده تعداد زیادی متغیر است، میزان رشد تعداد متغیرها با توجه به ابعاد مسئله نیز بررسی شد. بر همین اساس، چندین مسئله آزمایشی مطابق جدول شماره ۶ تعریف شد.



جدول ۶- میزان رشد تعداد متغیرها با توجه به ابعاد مسئله

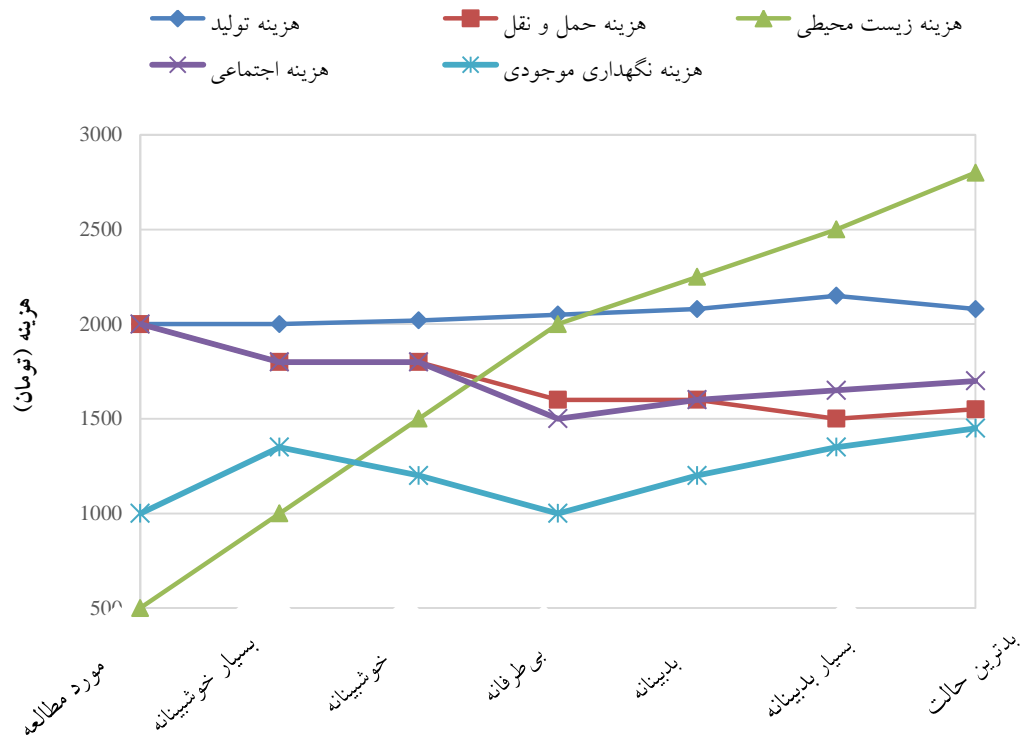
شماره مسئله	ابعاد مسئله									
	P	V	K	S	R	M	T	تعداد محدودیت‌ها	تعداد متغیرهای پیوسته	تعداد متغیرهای باینری
۱	۳	۳	۱	۳	۲	۱	۵	۳۵۶	۵۱۷	۴۱
۲	۶	۶	۲	۳	۴	۱	۸	۴۴۷	۷۷۳	۵۷
۳	۸	۱۰	۳	۳	۶	۲	۱۰	۱۲۲۷	۲۶۶۷	۱۰۱
۴	۱۰	۱۲	۵	۳	۱۰	۵	۱۲	۴۸۰۹	۱۸۲۶۹	۲۸۹
۵	۱۰	۱۳	۶	۳	۱۲	۶	۹	۵۸۹۹	۲۴۵۶۷	۳۶۱
۶	۱۲	۱۱	۵	۳	۱۴	۵	۸	۷۹۳۷	۳۷۵۰۴	۴۱۸
۷	۱۴	۱۲	۷	۳	۱۲	۶	۸	۱۰۰۷۹	۵۳۲۹۹	۵۴۱
۸	۱۶	۱۴	۶	۳	۱۰	۷	۱۰	۱۲۷۰۴	۷۳۹۳۹	۶۱۳
۹	۱۸	۱۶	۸	۳	۱۲	۷	۱۰	۱۵۳۵۳	۹۷۹۸۷	۷۵۱
۱۰	۲۰	۱۸	۹	۳	۱۴	۸	۱۰	۱۸۱۰۳	۱۱۷۴۰۱	۸۳۸

#### ۱,۴ تحلیل حساسیت

در این بخش، حساسیت تابع هدف در برابر مقدار پارامترهای هزینه‌های اقتصادی و تقاضا و طول عمر محصول بررسی می‌شود.

#### ۱,۱,۴ تحلیل حساسیت هزینه‌های اقتصادی

در شکل شماره ۵، تأثیر احتمالات سناریو بر اجزای بهینه هزینه‌های زنجیره تأمین نشان داده شده است. در مطالعه موردی، که پیش‌تر توضیح داده شد، با توجه به شکل شماره ۵ به نظر می‌رسد تغییر وضعیت، تأثیر زیادی بر هزینه‌های حمل‌ونقل بهینه، هزینه تولید، هزینه نگهداری موجودی و هزینه اجتماعی ندارد. با این حال، با بدتر شدن شرایط، هزینه آثار زیست‌محیطی افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، وقتی وضعیت، «بدبینانه» باشد، هزینه‌های تأثیرات زیست‌محیطی در بالاترین سطح خود قرار دارد؛ بنابراین، مدیران زنجیره تأمین می‌توانند اقدامات مناسبی را برای کاهش این نوع هزینه زنجیره تأمین انجام دهند.

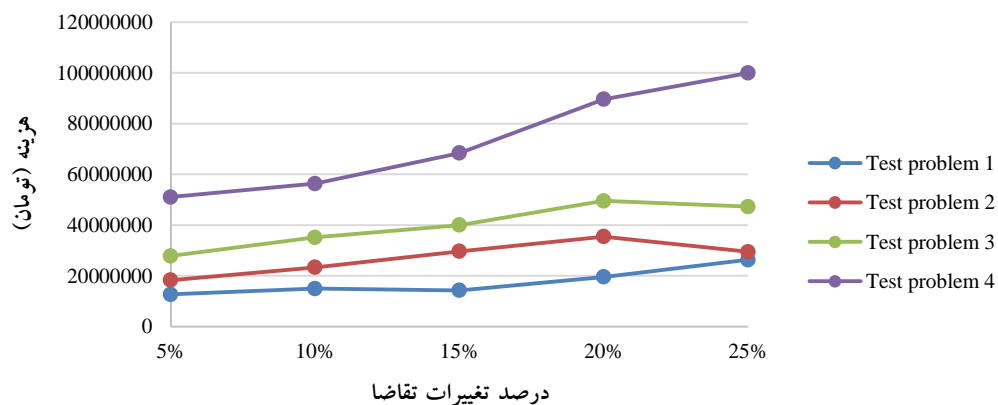


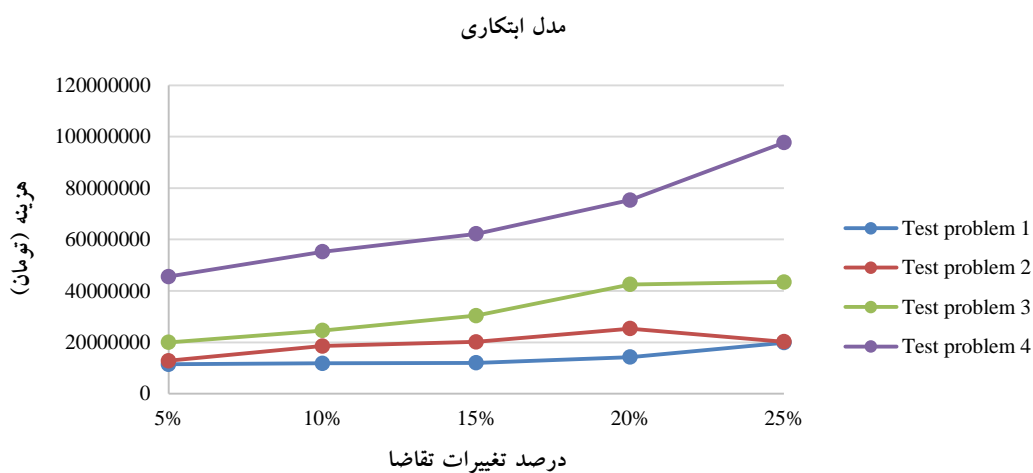
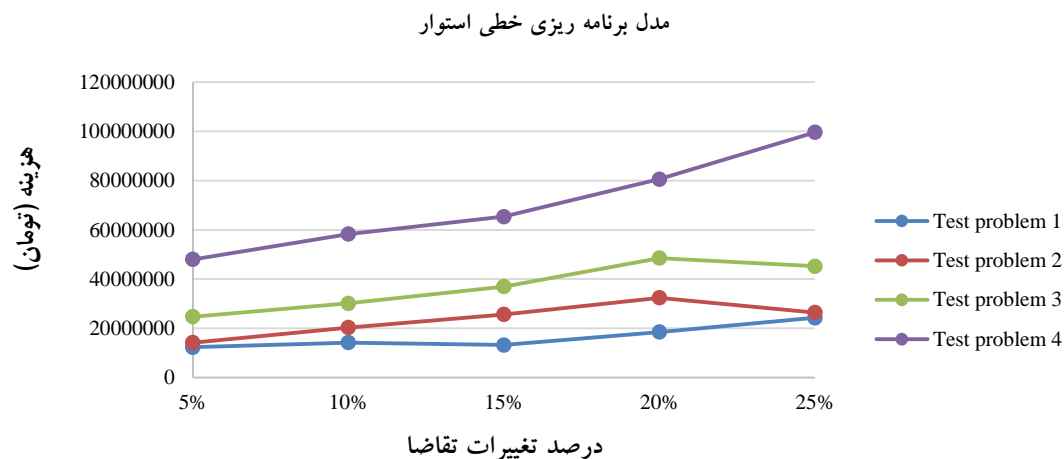
شکل ۵- تأثیر سناریوهای مختلف بر پارامترهای هزینه زنجیره تأمین

#### ۲.۱.۴. تحلیل حساسیت تقاضا

در شکل شماره ۶، حساسیت تابع هدف در برابر مقدار تقاضا بررسی شده است. همانگونه که مشخص است، مقدار تابع هدف، ارتباط مستقیمی با تغییر تقاضا دارد. با افزایش تقاضا در سطوح مختلف عدم قطعیت، هزینه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

مدل برنامه ریزی غیرخطی استوار

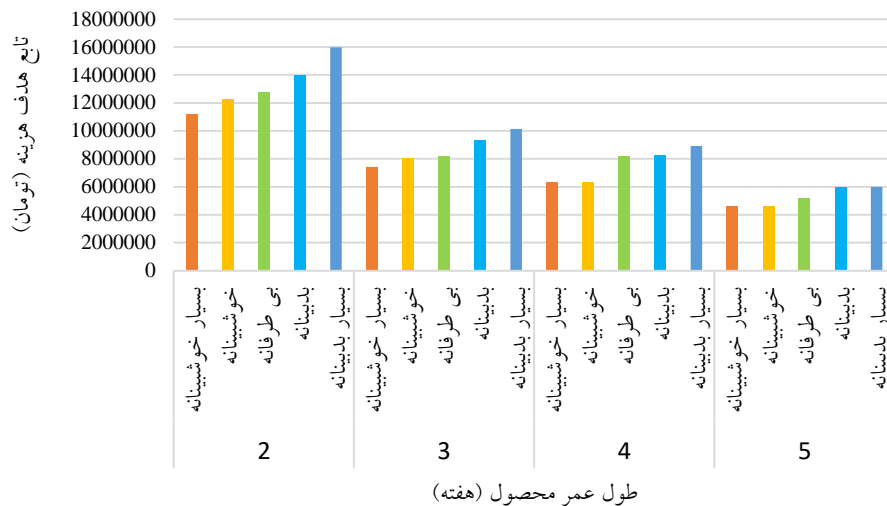




شکل ۶- تحلیل حساسیت تقاضا

### ۳,۱,۴ تحلیل حساسیت طول عمر محصول

مطابق شکل شماره ۷، نتایج نشان می‌دهد تأثیر چرخه عمر محصول بر هدف هزینه متفاوت است و در هر سناریو، افزایش طول عمر محصول به کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین در سناریوهای مختلف منجر می‌شود؛ به‌طور مثال، در سناریوی خوش‌بینانه با افزایش طول عمر، تابع هدف هزینه کاهش می‌یابد. همچنین، در مسائل با عدم اطمینان زیاد (به‌عنوان مثال، بدترین سطح) اهمیت انتخاب سناریوی مناسب با افزایش طول عمر محصولات بیشتر است.



شکل ۷- تأثیر سناریوهای مختلف بر طول عمر محصول و میزان تابع هدف هزینه

## ۵. بحث

پژوهش حاضر از اولین پژوهش‌های کمی است که یک زنجیره تأمین متمرکز چندسطحی و چندمحصولی - چنددوره‌ای را با عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا، ظرفیت تسهیلات و هزینه‌های اقتصادی (هزینه‌های حمل و نقل، هزینه‌های تولید، هزینه‌های نگهداری) در صنعت لبنیات کشور بررسی و هزینه‌های زیست‌محیطی تولید و حمل و نقل و هزینه‌های اجتماعی پایداری همچون استخدام ایجاد شغل و اخراج برای اشخاص و روزهای کاری از دست رفته را به‌طور هم‌زمان با بُعد اقتصادی در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت تولید و موجودی ترکیب می‌کند. همچنین، مطالعه حاضر از جمله مطالعاتی است که تاریخ انقضای محصول و سیاست صدور کالا از انبار (سیاست خروج به ترتیب ورود) را در نظر گرفته است. گفتنی است نزدیک‌ترین پژوهش‌ها به پژوهش حاضر از نظر مدل‌سازی، پژوهش‌های یآوری و گرائیلی (۲۰۱۹) و جتتیان و همکاران (۲۰۱۹) است. یآوری و گرائیلی (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای به حداقل رساندن هزینه و آلودگی‌های محیطی برای زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر در صنعت لبنیات ارائه دادند. تفاوت پژوهش آنها با پژوهش حاضر در این است که بُعد اجتماعی، تاریخ انقضای محصولات و سیاست صدور محصولات در مدل‌سازی پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است؛ در حالی که این موارد در پژوهش یآوری و گرائیلی (۲۰۱۹) در نظر گرفته نشده است.

با توجه به جدول شماره ۱ (جدول پیشینه)، پارامترهای عدم قطعیت دیگر پژوهش‌ها با پژوهش حاضر، مشابه نیست؛ بنابراین، امکان مقایسه نتایج وجود ندارد.

جتتیان و همکاران (۲۰۱۹) نیز مدل بهینه‌سازی شبکه توزیع پایدار دارو را ارائه دادند که تفاوت آن با پژوهش حاضر در صنعت مورد بررسی، در نظر گرفتن تاریخ انقضا و سیاست صدور محصولات، چندمحصولی - چنددوره‌ای بودن مدل و روش حل است.

با توجه به تجزیه و تحلیل یافته‌ها، گفتنی است:

- معمولاً مسئولیت اجتماعی در شرکت‌ها نادیده گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر، ایده‌ای برای اندازه‌گیری و محقق‌ساختن آن در شرکت ارائه شده است.

- با توجه به عدم قطعیت برخی از پارامترهای کلیدی، استفاده از مدل‌های استوار به مدیران کمک می‌کند درباره جریان‌های مالی در بازارهای نامشخص و جریان بهینه مواد در تولید محصولات انعطاف‌پذیر در زنجیره تأمین لبنیات، تصمیم‌های بهتری اتخاذ کنند.

- با توجه به طول عمر متنوع محصولات و اهمیت آن در آلودگی محیط زیست، مدیران تولید در زنجیره تأمین لبنیات می‌توانند تصمیم‌های مناسبی درباره سیستم تولید با بیشترین دوام محصولات و حداقل آلودگی محیط زیست اتخاذ کنند که به رشد اقتصادی در این صنعت منجر می‌شود.

- فاسدشدن محصولات (به‌ویژه محصولاتی که عمر مفید آنها کوتاه است) به پیچیدگی مسئله موجودی اضافه می‌کند؛ بنابراین، مدیران با در نظر گرفتن سیستم صدور خروج به‌ترتیب ورود محصولات، هزینه موجودی را می‌توانند به حداقل برسانند.

- در صورتی که شرکتی بخواهد به سمت ارزیابی سه‌گانه عملکردهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی حرکت کند، می‌تواند از ساختار پیشنهادی و الگوی حل پژوهش حاضر استفاده کند.

## ۶. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر، مدلی برای دستیابی شرکت‌ها به توسعه پایدار ارائه می‌دهد. بر این اساس، یک زنجیره تأمین پایدار سه‌سطحی شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده و خرده‌فروش برای محصولات فسادپذیر بررسی شد. هدف، کاهش هزینه کل زنجیره تأمین با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی بود. بر همین اساس، هزینه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا، هزینه‌های اقتصادی و ظرفیت تسهیلات و زمان انقضای محصول و سیاست خروج به‌ترتیب ورود محصولات از انبار در نظر گرفته شد و مدل پیشنهادی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار و روشی ابتکاری حل شد.

نتایج نشان داد ارزش تابع هدف در شرایط قطعی بسیار نزدیک به وضعیت استوار بوده است و این موضوع، عملکرد مناسب مدل را در برخورد با عدم قطعیت نشان داد. با در نظر گرفتن خروجی‌های سه مدل، عملکرد رویکرد ابتکاری از نظر ارزش تابع هدف و زمان حل مسئله بهتر بود.

به‌کارگیری مدل‌های استوار، تأثیر مهمی در کمک به مدیران برای تصمیم‌گیری در بازارهای نامطمئن دارد تا جریان مواد را در تولید محصولات لبنی بهینه کند. همچنین، عامل مهمی در ایجاد هزینه‌های زنجیره تأمین، طول عمر محصولات است که افزایش آن، سبب کاهش هزینه زنجیره تأمین می‌شود و مدیران باید تصمیم‌هایی برای تولید محصولاتی با ماندگاری بیشتر اتخاذ کنند تا علاوه بر کاهش آلودگی زیست‌محیطی، سبب رشد اقتصادی در این صنعت شود.

از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر، در نظر نگرفتن مباحث مرتبط با برنامه‌ریزی تولید، مانند استراتژی‌های تولید ادغامی و اضافه‌کاری، در نظر گرفتن ظرفیت حجمی و وزنی یکسان برای وسایل نقلیه، ادغام سه جنبه پایداری در یک تابع هدف و تک‌هدفه‌بودن مدل و بررسی و پیاده‌سازی مدل ارائه‌شده در یک صنعت (لبنیات) است. بدین منظور، برای انجام‌دادن پژوهش‌های آتی، در نظر گرفتن موضوعات مرتبط با برنامه‌ریزی تولید، از جمله تولید با استراتژی‌های مختلف تولید ادغامی و اضافه‌کاری، استفاده از وسایل نقلیه متفاوت و ناهمگن و

انتخاب ناوگان حمل و نقل مناسب برای حمل مواد اولیه و محصولات، ارائه مدل ریاضی چندهدفه و توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل ریاضی پیشنهادی در ابعاد بزرگ، پیاده‌سازی مدل در سایر صنایع غذایی فسادپذیر و افزودن مباحث مرتبط با سیستم‌های بسته‌بندی محصول به مسئله فعلی پیشنهاد می‌شود.

## References

- Ahmadi, K., and Abdollahzadeh, S. (2020). "A model for the integration of production-distribution levels in the supply chain of non-perishable materials by considering intermediate warehouses". *Production and Operations Management*, 10(2): 37-53.
- Aramantzi, C., and Minis, I. (2017). "A new model for designing sustainable supply chain networks and its application to a global manufacturer". *Journal of Cleaner Production*, 156: 276-292.
- Arslan, M., and Turkay, M. (2013). "EOQ Revisited with Sustainability Considerations". *Foundations of Computing Decision Sciences*, 38(4): 223-249.
- Bouchery, Y., Ghaffari, A., Jemai, Z., and Fransoo, J. (2016). "Sustainable transportation and order quantity: insights from multiobjective optimization". *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(3): 367-396.
- Bozorgi, A. (2016). "Multi-product inventory model for cold items with cost and emission consideration". *Int. J. Production Economics*, 176: 123-142.
- Darom, N., Hishamuddin, H., Ramli, R., and Nopiah, Z. (2018). "An inventory model of supply chain disruption recovery with safety stock and carbon emission consideration". *Journal of Cleaner Production*, 197: 1011-1021.
- Deng, X., Yang, X., Zhang, Y., Li, Y., and Lu, Z. (2019). "Risk propagation mechanisms and risk management strategies for a sustainable perishable products supply chain". *Computers and Industrial Engineering*, 135: 1175-1187.
- Fahimnia, B., Sarkis, J., and Eshragh, A. (2015). "A tradeoff model for green supply chain planning A leanness-versus-greenness analysis". *Omega*, 54: 173-190.
- Gholizadeh, H., Fazlollahtabar, H., and Khalilzadeh, M. (2020). "A robust fuzzy stochastic programming for sustainable procurement and logistics under hybrid uncertainty using big data". *Journal of Cleaner Production*, 258: 120460.
- Gholizadeh, H., Tajdin, A., and Javadian, N. (2018). "A closed-loop supply chain robust optimization for disposable appliances". *Neural Computing and Applications*, 32: 3967-3985.
- Hajimirzajan, A., Pirayesh, M., and Dehghanian, F. (2015). "Developing a supply chain planning model for perishable crops". *Production and Operation Management*, 6(1): 35-60.
- Hariga, M., As'ad, R., and Shamayleh, A. (2017). "Integrated economic and environmental models for a multi stage cold supply chain under carbon tax regulation". *Journal of Cleaner Production*, 166: 1357-1371.
- Janatyan, N., Zandieh, M., Alem Tabriz, A., and Rabieh, M. (2019). "Optimizing Sustainable Pharmaceutical Distribution Network Model with Evolutionary Multi objective Algorithms (Case Study: Darupakhsh Company)". *Production and Operations Management*, 10(1): 133-153.
- Konur, D., Campbell, J., and Monfared, S. (2017). "Economic and environmental considerations in a stochastic inventory control model with order splitting under different delivery schedules among suppliers". *Omega*, 71: 46-65.
- Mani, V., Jabbar, C., and Mani, K. (2020). "Supply chain social sustainability in small and medium manufacturing enterprises and firms' performance: Empirical evidence from an emerging Asian economy". *International Journal of Production Economics*, 227, 107656.

- Mohammed, F., Selim, S., Hassan, A., and Syed, M. (2017). "Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51: 146-172.
- Mulvey, J., Vanderbei, R., and Zenios, S. (1995). "Robust Optimization of Large-Scale Systems". *Operations Research*, 43: 264-281.
- Nunes, J. D., Silva, P., Andrade, L., and Gaspar, P. (2016). "Key points on the energy sustainable development of the food industry - Case study of the Portuguese sausages industry". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57: 393-411.
- Pauls-Worm, K.J.J., Hendrix, E.M.T., Haijema, R., and Van der vorst, J.G.A.J. (2014). "An MILP approximation for ordering perishable products with non-stationary demand and service level constraints". *Int. J. Production Economics*, 157: 133-146.
- Pishvae, M., Rabbani, M., and Torabi, S. (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty". *Applied Mathematical Modelling*, 35: 637-649.
- Sabbaghnia, A., and Taleizadeh, A. (2020). "Quality, buyback and technology licensing considerations in a two-period manufacturing–remanufacturing system: a closed-loop and sustainable supply chain". *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 1-18.
- Saidi-Mehrabad, M., and Aazami, A. "A Bi-Level Robust Optimization Model in Production Planning by Considering of Pricing Decisions for Satisfying the Demand in a Competitive Environment: a Case Study". *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 5(11): 173-191.
- Sazvar, Z., and Sepehri, M. (2020). "An integrated replenishment-recruitment policy in a sustainable retailing system for deteriorating products". *Socio-Economic Planning Sciences*, 69, 100686.
- Schaefer, B., and Konur, D. (2015). "Economic and environmental considerations in a continuous review inventory control system with integrated transportation decisions". *Transportation Research Part E*, 80: 142-165.
- Shamayleh, A., Hariga, M., As'ad, R., and Diabat, A. (2019). "Economic and environmental models for cold products with time varying demand". *Journal of Cleaner Production*, 212: 847-863.
- Singh, R., Luthra, S., Mangla, S., and Uniyal, S. (2019). "Applications of information and communication technology for sustainable growth of SMEs in India food industry". *Resources, Conservation and Recycling*, 147: 10-18.
- Taleizadeh, A., Soleymanfar, V., and Govindan, K. (2018). "Sustainable economic production quantity models for inventory systems with shortage". *Journal of Cleaner Production*, 174: 1011-1020.
- Tiwari, S., Daryanto, Y., and Wee, H. M. (2018). "Sustainable inventory management with deteriorating and imperfect quality items considering carbon emission". *Journal of Cleaner Production*, 192: 281-292.
- Vaez, P., Sabouhi, F., and Jabalameli, M. (2019). "Sustainability in a lot-sizing and scheduling problem with delivery time window and sequence-dependent setup cost consideration". *Sustainable Cities and Society*, 51, 101718.
- Valderrama, C., González, E., Pimentel, B., Véjar, A., and Bustos, L. (2020). "Designing an environmental supply chain network in the mining industry to reduce carbon emissions". *Journal of Cleaner Production*, 254, 119688.
- Vidal, C., and Goetschalckx, M. (2001). "A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation". *European Journal of Operational Research*, 129: 134-158.
- Yavari, M., and Geraeli, M. (2019). "Heuristics method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods". *Journal of Cleaner Production*, 226: 282-305.

1. Arampantzi and Minis
2. Mohammed
3. Nunes
4. Singh
5. Sazvar
6. Sepehri
7. Deng
8. Sabbaghnia
9. Taleizadeh
10. Valderrama
11. Mani
12. Shamayleh
13. Darom
14. Tiwari
15. Yavari
16. Geraeli
17. Mixed Integer Linear Programming (MILP)
18. Janatyan
19. Konur
20. Hajimirzajan
21. Pauls-Worm
22. First-in, first-out (FIFO)
23. Ahmadi
24. Fahimnia
25. Lirst-in, first-out (LIFO)
26. Abdollahzadeh
27. Vaez
28. Hariga
29. An Efficient Search Procedure
30. Bozorgi
31. Bouchery
32. Schaefer
33. Arsalan
34. Turkey
35. Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)
36. Partial Backorder
37. Lost Sale
38. Gholizadeh
39. Vidal and Goetschalckx
40. Mulvey
41. Yu
42. Li
43. Pishvae
44. Relax
45. Relaxation
46. Test Problem
47. Dicopt
48. Cplex
49. Optimal Gap Percentage