

Designing a New Model for Producing LED Lamps Considering the Quality Effects of Raw Materials on the Rate of Returned Items

(Document Type: Research Paper)

Mohammad Reza Gholamian*

Logistics and Supply Chain Engineering Group, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran, gholamian@iust.ac.ir

Ebrahim Mohammadi Hosein Hajlu

Systems Engineering Group, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran, e.mohamadi.ie@gmail.com

Purpose: Supply chain management has always been of interest to researchers because of generating competitive advantage, such as reducing costs and increasing customer service levels. However, the mathematical models that can take into account the specific conditions of today's supply chain are negligible. The impact of factors such as the level of production quality on the returned items rate is one of the subjects that have received less attention. In this research, the mathematical model of the closed-loop supply chain developed concerning supplier selection and the effects of the quality level of provided raw material into the returned items rate

Design/methodology/approach: The investigated supply chain is a two-level closed-loop supply chain modelled with a multi-period time horizon. If there are defective products, customers can deliver the products to the collection centres and receive new products. In each period, the returned items rate depends on the level of production quality, and the level of production quality depends on the quality of raw materials provided by suppliers; thus, the returned items rate is indirectly affected by the quality of raw materials. Such is a subject that was not studied earlier.

Findings: Case study represents a real example of production and recycling of LED lamps. By comparing the financial data announced by the company with the results obtained from the model, the model showed a 3.37% improvement in the objective function. In the current situation, all materials purchased from only one supplier at quality level B (out of the three quality levels A, B and C); in the optimal case, however, most of the purchased materials are at quality level A.

Research limitations/implications: The relationship between quality level and the return rate is recognized by considering nonlinear functions, resulting from the fitting of these functions with real data. Also, the assumptions of multi-products in the supply chain and lateral transshipments between distributors/suppliers suggested for further study. In the case of considering multi-products, different selling prices are reasonable for the products. Also, greater profitability is achievable by considering coordination among the members of the supply chain.

* Corresponding author

Copyright © 2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

Practical implications: As practical implications, manufacturers can use this optimization model to i) determine the amount and quality level of raw materials provided by each supplier at each period; ii) determine the amount and quality of the final product produced at each period; iii) specify the number of distributors' orders at each period as well as the number of backorders; iv) determine the amount of returned items at each period. Thus, solving the model provides a comprehensive plan to the manufacturer in various dimensions of production.

Social implications: This theoretical-practical research performed to investigate one of the main problems of production systems. Unfortunately, in recent years, critical economic conditions, sanctions, and currency fluctuations have caused suppliers to provide raw materials with lower qualities instead of materials with high quality. These low-level materials also have an impact on the final products during production and reduce their quality level. As a result, the return rate of defective items increases and consequently, the loss of the company increases. Therefore, like what happens in the real world, the manufacturing company has to choose a combination of the materials with different qualities from the suppliers to maximize the company's profit. Mathematical modelling is needed to solve such a problem, and current research is an attempt to reach this mathematical model by considering all aspects of the production process.

Originality/value: The main novelty of this research is considering the quality levels for raw materials and its indirect effect on the return rate of defective items; so that the quality level of raw materials determines the quality level of final products, and the quality level of final products affects the returns rate. For this purpose, an integer programming method developed to formulate and solve the model.

Keywords: Closed-loop supply chain, Supplier selection, Rate of returned items, Production quality

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۱، شماره ۲، پیاپی ۲۱، تابستان ۱۳۹۹

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱

صص: ۱۱۵-۱۳۷ (نوع مقاله: پژوهشی)

طراحی مدل جدیدی برای تولید لامپ‌های LED با در نظر گرفتن تأثیر کیفیت مواد اولیه بر نرخ بازگشتی

محمدرضا غلامیان^{۱*}، ابراهیم محمدی حسین حاجیلو^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، gholamian@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد گروه مهندسی سیستم، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، e.mohamadi.ie@gmail.com

چکیده: مدیریت زنجیره تأمین به علت ایجاد مزیت‌های رقابتی، همچون کاهش هزینه‌ها و افزایش سطح خدمات به مشتری، همواره مدنظر پژوهشگران بوده است؛ با این حال، مدل‌های ریاضی‌ای که شرایط خاص زنجیره تأمین امروزی را در نظر بگیرد، بسیار اندک است. تأثیر عواملی همچون سطح کیفیت تولید بر نرخ اقلام بازگشتی، از جمله موضوعاتی است که کمتر به آن توجه شده است. در این پژوهش، مدل ریاضی مسئله زنجیره تأمین حلقه - بسته با در نظر گرفتن انتخاب تأمین‌کننده و تأثیر سطح کیفیت مواد اولیه تولیدی بر نرخ بازگشتی توسعه داده شده است. زنجیره تأمین مدنظر، زنجیره‌ای دوسطحی و حلقه - بسته است که به صورت چنددوره‌ای مدل‌سازی شده است. مورد مطالعاتی نیز مسئله واقعی تولید و بازیافت لامپ‌های LED است. مشتریان در صورت معیوب بودن کالا می‌توانند کالا را به مراکز جمع‌آوری تحویل دهند و کالای نو دریافت کنند. مقدار بازگشتی در هر دوره، به سطح کیفیت تولید مربوط است؛ اما سطح کیفیت تولید نیز به کیفیت مواد اولیه‌ای وابستگی دارد که تأمین‌کنندگان تهیه کرده‌اند و بدین ترتیب، نرخ کالاهای بازگشتی به‌طور غیرمستقیم از کیفیت مواد اولیه تأثیر می‌گیرد که براساس مطالعات انجام‌شده، به این موضوع در پژوهش‌های پیشین توجه نشده است. مدل‌سازی نهایی به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی انجام شده و برای اعتبار سنجی مدل، تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج با وضع موجود به کار رفته است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین حلقه - بسته، انتخاب تأمین‌کننده، نرخ بازگشت، کیفیت تولید

مصرف روشنائی، یکی از بخش‌های مهم تقاضای برق از نظر میزان قدرت دریافتی، مصرف انرژی و سهم تقاضای بازار اوج توان شبکه است. کاهش سهم این مؤلفه از اوج بار شبکه سراسری، یکی از سیاست‌های جاری وزارت نیروست. همچنین، ارزش انرژی و محدودیت منابع تولیدی باعث شده است کشورهای پیشرفته از کلیه راهکارهای صرفه جویی در مصرف انرژی به بهترین شکل ممکن استفاده کنند. یکی از این راهکارها جایگزینی لامپ‌های کم مصرف به جای لامپ‌های رشته‌ای است و اطلاعات و مستندات موجود نشان می‌دهد مصرف‌کنندگان در سال ۲۰۰۰ میلادی، از ۱۳۰۰ میلیون لامپ کم مصرف با مصرف ۲۰ هزار مگاوات برق به جای ۸۰ هزار مگاوات ضروری همان تعداد لامپ رشته‌ای استفاده کرده‌اند. ذخیره انرژی این تعداد لامپ کم مصرف، معادل انرژی حاصل از ۲۸ نیروگاه حرارتی است (حسینی و همکاران، ۱۳۷۹).

در این مطالعه، به طور مشخص لامپ‌های کم مصرف از نوع LED بررسی شده است. لامپ‌های LED، نوعی از لامپ‌های حالت جامد است که برای روشنائی از دیود نورافشان بهره می‌برد. این لامپ‌ها در گذشته، معمولاً به عنوان چراغی قرمز رنگ در درون دستگاه‌های الکترونیکی استفاده می‌شد. با توجه به مصرف برق کم لامپ LED نسبت به سایر لامپ‌ها استفاده نکردن از مواد سمی، همچون جیوه در درون لامپ، عمر بسیار زیاد و فناوری جدید ساخت این لامپ‌ها جای خود را در صنعت روشنائی در دنیا باز کرده است (حصاری و حنیفی، ۱۳۸۳)؛ ولی متأسفانه کیفیت مواد اولیه استفاده شده در تولید این نوع لامپ‌ها تأثیر زیادی در کیفیت لامپ‌های تولیدی دارد و در صورت استفاده از مواد اولیه نامرغوب، تولیدکنندگان با تعداد زیادی از لامپ‌های بازگشتی مواجه می‌شوند (دستی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵) که این مسئله، هزینه‌های اقتصادی بسیار زیادی را به آنها تحمیل می‌کند.

جدیدترین پژوهش‌ها در این زمینه نیز بر بهبود کیفیت مواد اولیه این لامپ‌ها متمرکز است؛ زیرا این بهبود کیفیت، تأثیر زیادی بر افزایش تولید و کاهش نرخ بازگشت دارد (ریتچر^۲ و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین، در این مطالعه، مدل‌سازی ریاضی زنجیره تأمین دوسطحی حلقه - بسته با در نظر گرفتن انتخاب تأمین‌کننده و تأثیر آن بر نرخ بازگشتی با فرض تأثیرگذاری قطعات تأمین‌شده از تأمین‌کنندگان بر کیفیت کالای تولیدی بررسی شده است. هدف از ارائه این مدل ریاضی، آن است که به تولیدکنندگان کمک شود برای انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب اقدام کنند؛ به گونه‌ای که با لحاظ کردن کیفیت مواد اولیه ارائه شده توسط تأمین‌کنندگان، تولیدکننده، تابع سود خود را به حداکثر برساند و اثر هزینه‌زای محصولات بازگشتی حاصل از این مواد اولیه خریداری شده را نیز در تابع سود خود لحاظ کند.

بر این اساس، مطالب ارائه شده در این مقاله به شرح ذیل است. در بخش دوم، مبانی نظری درباره مدل‌های زنجیره تأمین حلقه - بسته در قالب پیشینه پژوهش، مرور و شکاف‌های پژوهشی شناسایی شده است؛ سپس در بخش سوم، مبانی نظری در قالب مدل‌سازی مسئله توسعه داده شده، اجزای مدل به صورت جداگانه، ولی گام به گام تشریح می‌شود. بخش چهارم به روش‌شناسی پژوهش اختصاص دارد و در بخش پنجم، مطالعه موردی و یافته‌های پژوهش در قالب نتایج حل مدل با داده‌های واقعی ارائه می‌شود. در بخش بعدی، با تحلیل حساسیت پارامترهای اصلی و مقایسه نتایج مدل با وضعیت کنونی، اعتبارسنجی مدل و نتایج حاصل از پژوهش، بحث و تجزیه و تحلیل می‌شود. در نهایت، بخش آخر به جمع‌بندی و مرور مطالعات بعدی اختصاص یافته است.

مسئله کیفیت در زنجیره تأمین حلقه - بسته، از جمله مسائلی است که در سال‌های اخیر به آن بسیار توجه شده است (گویندان^۳ و سلیمانی، ۲۰۱۷). از جمله پژوهش‌های اولیه در این زمینه، می‌توان به پژوهش جابر و ال سادانی^۴ (۲۰۰۹) اشاره کرد که مدل خود را با این فرض توسعه داده‌اند که کیفیت کالاهای بازگشتی، کمتر از کالاهای تولیدی جدید است و بنابراین، تقاضا برای کالاهای جدید با کالاهای بازتولیدی متفاوت است. ال سادانی و جابر (۲۰۱۰) نیز نرخ بازگشتی را تابعی از کیفیت مطلوب و قیمت محصول نهایی در نظر گرفته‌اند که کیفیت در آن به صورت درصدی از قطعات قابل استفاده از کالایی بازگشتی تعریف شده است. این پژوهش با افزودن فرض یادگیری در فرایند تولید و بازتولید نیز توسعه داده شده است (جابر و ال سادانی، ۲۰۱۱). همچنین، در نظر گرفتن زیرمونتازها در فرایند تولید-بازتولید از دیگر توسعه‌های انجام‌شده در این پژوهش است (ال سادانی و جابر، ۲۰۱۱). همسو با این مورد، موضوع با در نظر گرفتن لیست مواد^۵ برای دمونتاز کالای بازگشتی به زیرقطعات و استفاده مجدد آنها نیز بررسی شده است. حسن اوف^۶ و همکاران (۲۰۱۲) نیز گسترشی از مدل جابر و ال سادانی (۲۰۰۹) را با فرض در نظر گرفتن سفارش عقب‌افتاده جزئی یا کلی برای تقاضای پوشش‌داده‌نشده کالاهای تولیدی و بازتولیدی (تعمیرشده) ارائه داده‌اند. همچنین، در گسترشی دیگر، فرض محدودیت‌نداشتن تعداد دفعات تعمیر، بازبینی و برای آن محدودیتی در مدل ایجاد شده است (ال سادانی و همکاران، ۲۰۱۱). در پژوهش نیک‌نژاد و پترویچ^۷ (۲۰۱۴)، دو مسیر بازیابی (شامل تعمیر و بازسازی) در شبکه لجستیک معکوس در نظر گرفته شده است. کالاهای مرجوعی، سطوح مختلف کیفی دارد و حد کیفی خاصی در نظر گرفته شده است تا کالاهای بازگشتی را برای بازسازی و یا امحا جداسازی کند. مواندیا، جا و تاگر^۸ (۲۰۱۵) نیز مسئله کنترل تولید-موجودی زنجیره تأمین حلقه - بسته دوسطحی را توسعه داده‌اند که در آن، خرده‌فروش، تقاضای خود را هم از تولیدکننده و هم از مرکز بازتولید دریافت می‌کند. مایتی و گیری^۹ (۲۰۱۵) به هماهنگی در مدل تولید-بازتولید توجه کرده‌اند و براساس نظریه بازی‌ها، پنج مدل مختلف هماهنگی را توسعه داده و با هم مقایسه کرده‌اند. مقدم (۲۰۱۵a) مدل ریاضی چندهدفه برای رتبه‌بندی انتخاب تأمین‌کنندگان و تعیین مقدار بهینه کالاهای جدید، نوسازی‌شده و نهایی را با در نظر گرفتن تقاضا، ظرفیت و درصد کالای مرجوعی فازی توسعه داده است. همچنین، برای حل مسئله و استخراج جواب‌های بهینه پارتو از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده کرده است. علاوه بر این، پژوهش مذکور با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی آرمانی به جای برنامه‌ریزی چندهدفه نیز توسعه داده شده است (مقدم، ۲۰۱۵b). گیری و شارما^{۱۰} (۲۰۱۶)، سیستم زنجیره تأمین حلقه - بسته را با تقاضای تصادفی و نرخ بازگشت تصادفی توسعه داده‌اند. در این پژوهش، مواد اولیه حاصل از تأمین‌کننده اولیه، ارزان‌تر اما نامطمئن‌تر است و در مقابل تأمین‌کننده ثانویه، قیمت بیشتری دارد؛ ولی ازلحاظ تأمین مواد اولیه، قابلیت اطمینان کامل را دارد. بنکروف، اسکوری و کانستنتاریس^{۱۱} (۲۰۱۶)، مدلی را با بازه زمانی محدود و تقاضای متغیر با زمان توسعه داده‌اند که در آن، کالای نوسازی‌شده همانند کالای نو در نظر گرفته نمی‌شود و با قیمت کمتر در بازار ثانویه فروخته می‌شود. شکاریان و همکاران (۲۰۱۶)، مدلی با قابلیت بازیابی با نام نظریه یادگیری توسعه داده‌اند. فرض بر این است که با افزایش تعداد تولید کالاهای زمان تعمیر کالاهای بازگشتی، به علت اثر یادگیری، کاهش می‌یابد.

مسعودی‌پور و همکاران (۲۰۱۷) برای محصولات بازگشتی، به‌ترتیب، سه سطح کیفی تعمیرشونده، بازتولیدشونده و بازیافت‌شونده قائل شده‌اند و قیمت خرید محصولات بازگشتی از مشتریان را بر مبنای این سطوح کیفی به‌ترتیب، معادل ۵۰، ۳۰ و ۵ درصد قیمت اولیه محصول در نظر گرفته‌اند. در پژوهشی مشابه، باتاچریا، کار و آمیت^{۱۲} (۲۰۱۸)، سطوح کیفی محصولات بازگشتی را به‌صورت n سطحی در نظر گرفته‌اند که در آن، قیمت خرید محصولات بازگشتی براساس دوره عمر آنها کاهش یافته؛ ولی تعداد محصولات بازگشتی با توزیع نرمال بین سطوح در نظر گرفته شده است. میرمحمدی و صحرائیان (۲۰۱۸)، مدل مسعودی‌پور را در مدلی سه‌هدفه مبتنی بر ابعاد پایداری و با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت مراکز در لجستیک معکوس و ظرفیت وسایل حمل‌ونقل توسعه داده‌اند. این مدل را طالع‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) توسعه داده‌اند. در مدل چنددوره‌ای ارائه‌شده، تخفیف‌هایی به مشتریان براساس کیفیت محصولات بازگشتی و مبتنی بر عمر محصول داده می‌شود. تخفیف‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده است که احتمال بازگشت محصولات قدیمی‌تر، بیشتر از محصولات نو باشد.

جیحونیان و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۷)، زنجیره حلقه - بسته‌ای را برای محصولات بادوام توسعه داده‌اند که محصولات در آن به‌صورت ماژولار و هر ماژول نیز شامل چندین قطعه است؛ بنابراین، ماژول‌ها و قطعات سالم، امکان بازگشت به خط تولید را دارند. قطعات باقیمانده نیز یا در بازار ثانویه فروخته می‌شود و یا دورریز می‌شود. در این مدل، کیفیت قطعات بازگشتی به‌صورت تصادفی دیده شده و بر این اساس، مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مدل‌سازی شده است. به‌طور مشابه، شاه‌پروری^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۸)، زنجیره حلقه - بسته‌ای را به‌صورت چندمحصولی شامل ماژول‌ها و قطعات طراحی کردند. در این پژوهش، سه سطح کیفی نو، نو-کارکرده و کارکرده برای هر سه رده محصول - ماژول - قطعه در نظر گرفته شده است و مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، مدل‌سازی شده است. درنهایت، گوئو و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۹)، زنجیره حلقه - بسته‌ای را توسعه دادند که در آن، کیفیت به‌صورت یک تابع نمایی در نظر گرفته شده و هزینه‌های بازخرید، نرخ بازگشتی و هزینه‌های بازتولید، تابعی از سطح کیفیت است.

گفتنی است در پژوهش‌های اندکی، مسئله موجودی زنجیره تأمین حلقه - بسته و انتخاب تأمین‌کننده به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است و پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه در ابتدای مسیر خود قرار دارد. در جدول شماره ۱، بخشی از مهم‌ترین پژوهش‌ها در این زمینه آورده شده است.

جدول ۱- مقایسه پژوهش‌های انجام‌شده در مبانی نظری موضوع

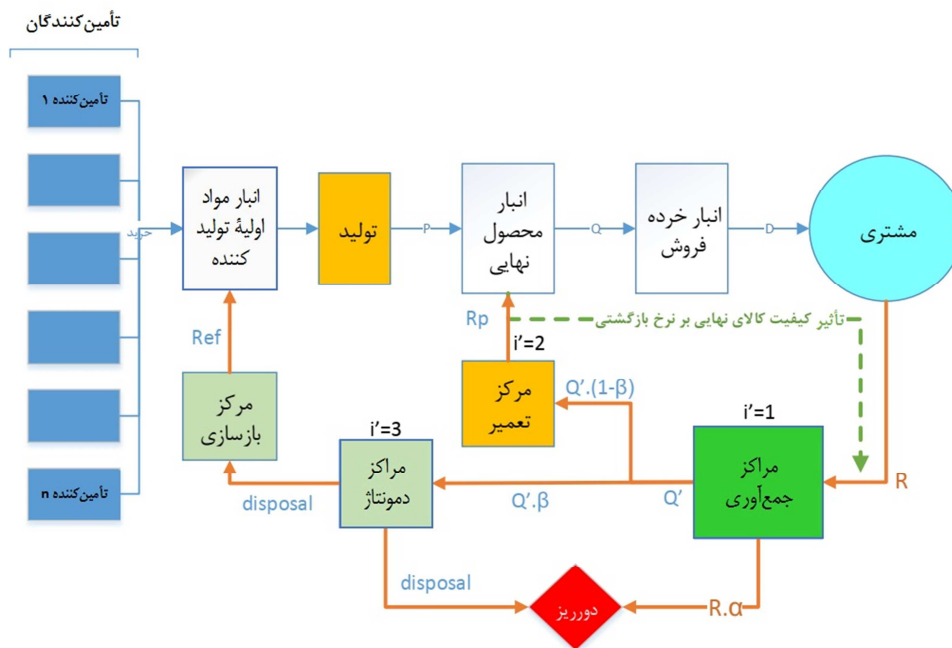
وابستگی نرخ بازگشتی	انتخاب تأمین‌کننده	کمیته	عدم قطعیت			تعداد محصول		دوره		نوع مسئله	سال	نویسنده
			تاریخ	تاریخ	تاریخ	تعداد	تعداد	نام‌محصول	تعداد			
تقاضا		✓	✓			✓			✓	✓	۲۰۰۹	جابر، ال سادانی
کیفیت- تقاضا		✓	✓			✓			✓	✓	۲۰۱۰	ال سادانی، جابر
تقاضا			✓			✓			✓	✓	۲۰۱۱	جابر، ال سادانی
تقاضا			✓			✓			✓	✓	۲۰۱۱	ال سادانی، جابر
تقاضا			✓			✓			✓	✓	۲۰۱۲	حسن اوف و همکاران
تقاضا			✓			✓			✓	✓	۲۰۱۳	ال سادانی و همکاران
موجودی					✓	✓			✓	✓	۲۰۱۴	نیک‌نژاد و پتروویچ
تقاضا			✓			✓			✓	✓	۲۰۱۵	مواندایا و همکاران
تقاضا		✓	✓			✓			✓	✓	۲۰۱۵	مایتی و گیری
فروش	✓	✓			✓		✓			✓	۲۰۱۵	مقدم
تقاضا	✓			✓		✓			✓	✓	۲۰۱۶	گیری و شارما
تقاضا			✓			✓		✓		✓	۲۰۱۶	بنگروف و همکاران
تقاضا					✓	✓			✓	✓	۲۰۱۶	شکاریان و همکاران
تقاضا		✓	✓			✓			✓	✓	۲۰۱۷	مسعودی پور و همکاران
تقاضا		✓		✓		✓			✓	✓	۲۰۱۷	جیحونیان و همکاران
فروش		✓		✓		✓				✓	۲۰۱۸	باتاچریا و همکاران
تقاضا		✓		✓		✓			✓	✓	۲۰۱۸	شاه‌پروری و همکاران
کیفیت		✓		✓		✓			✓	✓	۲۰۱۹	گنو و همکاران
تقاضا		✓	✓			✓			✓	✓	۲۰۱۹	طلعی‌زاده و همکاران
کیفیت- تولید	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓	۲۰۱۹	این پژوهش

این پژوهش، توسعه‌ای از مدل مقدم (۲۰۱۵a) است که در آن، تأثیر سطح کیفیت کالاهای تولیدی بر نرخ بازگشتی‌ها بر مبنای مفاهیم توسعه‌داده‌شده ال سادانی و جابر در نظر گرفته شده است. همانگونه که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود، در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین، نرخ بازگشت به کیفیت مواد اولیه و تولید وابسته نیست؛ در حالی که، همانگونه که در بخش مقدمه اشاره شد، اگر کیفیت مواد اولیه تولید لامپ‌های LED نامناسب باشد، این مسئله، اثر خود را بر تولید می‌گذارد؛ بنابراین، میزان محصولات معیوب پس از استفاده افزایش می‌یابد. نکته مهم در این زمینه آن است که وابستگی نرخ بازگشتی از عواملی همچون تقاضا، فروش یا موجودی، از نوع صنعت و کالای تولیدی در آن صنعت متأثر است. همانگونه که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود، در بسیاری از پژوهش‌ها، نرخ بازگشت، وابسته به تقاضا در نظر گرفته شده است؛ حال آنکه پژوهش‌های میدانی انجام‌شده برای این محصول (لامپ‌های LED) نشان داد با توجه به اینکه این کالا، کالایی اساسی نیست و کالاهای رقیب همچون لامپ‌های فلورسنت و رشته‌ای دارد و بازار آن انحصاری نیست و شرکت‌های متعددی در حال تولید محصول هستند، نرخ بازگشت به تقاضا وابسته نیست و بیشتر، از کیفیت کالای تولید تأثیر گرفته است. همچنین، کیفیت محصول تولیدی نیز به مواد اولیه مورد استفاده وابسته است؛ بنابراین؛ مدل بر مبنای وابستگی غیرمستقیم نرخ بازگشتی به کیفیت مواد اولیه توسعه پیدا کرد.

در این مدل‌سازی، زنجیره تأمین مدنظر حلقه - بسته، دوسطحی و تک‌کالایی است. تولیدکننده برای تولید کالا به قطعات مختلفی نیاز دارد که تأمین‌کنندگان خارجی، آنها را تأمین می‌کنند. هر تأمین‌کننده، قطعات اولیه را با کیفیت و قیمت‌های متفاوتی عرضه می‌کند و کیفیت کالای تولیدی به کیفیت قطعات اولیه وابسته است و سطح کیفیت تولید نیز در تعیین نرخ بازگشتی مؤثر است. توزیع‌کنندگان، تقاضای مشتریان را دریافت می‌کنند و در صورت موجودبودن کالا در انبار، تقاضا پاسخ داده می‌شود و در غیر این صورت، توزیع‌کننده با کمبود مواجه می‌شود که در دوره‌های بعدی، جبران‌پذیر است. در صورت معیوب‌بودن کالا، مشتریان می‌توانند کالاها را به مراکز جمع‌آوری تحویل دهند و در مقابل، کالاهای نو دریافت کنند. کالاها در مراکز جمع‌آوری بازرسی می‌شود و اگر کالا بازاریابی‌پذیر (تعمیر یا دمونتاز) باشد، به بخش تعمیرات و دمونتاز در کارخانه فرستاده می‌شود. کالاهایی که تعمیر می‌شود، وارد انبار کالای نهایی تولیدکننده شده، قطعات حاصل از دمونتاز کالاهای معیوب، وارد انبار قطعات اولیه تولیدکننده می‌شود. فرض می‌شود کالای تعمیری، ارزش کالایی نو را دارد. نرخ بازگشتی، وابسته به میزان تولید و سطح کیفیت تولید در نظر گرفته شده است؛ به این صورت که هرچه سطح تولید بالاتر باشد (در سطح کیفیت ثابت)، نرخ بازگشتی نیز بیشتر می‌شود و هرچه کیفیت بهتر باشد (در سطح تولید ثابت)، نرخ بازگشتی نیز کمتر خواهد بود.

مدل به شکل چنددوره‌ای در نظر گرفته شده و نوآوری پژوهش بر مبنای این واقعیت شکل گرفته که قطعات تأمین‌شده از تأمین‌کنندگان بر کیفیت کالای تولیدی تأثیرگذار است. زنجیره تأمین مدل مبتنی بر مثالی واقعی از شرکت تولیدکننده لامپ‌های LED شکل گرفته و کوشش شده است مدل‌سازی تا حد امکان براساس شرایط واقعی موجود در این زنجیره تأمین انجام شود.

برای مدل‌سازی، از داده‌های مربوط به یک شرکت تولیدکننده لامپ‌های LED استفاده شده است. شرکت با هدف توسعه استفاده از محصولات و فناوری‌های روز دنیا در صنعت روشنایی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش رفاه عمومی تأسیس شده است. کالای مدنظر، پنل‌های LED است که به چهار زیرقطعه اصلی تقسیم‌بندی می‌شود که ضریب مصرف هر کدام از آنها در کالای نهایی، برابر یک است: ۱- بالاست؛ ۲- صفحه LED؛ ۳- سیم رابط تغذیه و ۴- بدنه. شرکت، گارانتی ۱۰ ماهه برای کالاها ارائه می‌دهد و در نمایندگی‌های فروش، کالاهای مرجوعی با کالاهای نو معاوضه می‌شود. کالاهای مرجوعی، قابل تعمیر و دمونتاژ هستند؛ بنابراین، در این مدل‌سازی زنجیره تأمین مدنظر، حلقه - بسته و دوسطحی و زنجیره، تک‌کالایی است. شکل شماره ۱، زنجیره تأمین مدنظر را نشان می‌دهد. شرکت برای تولید کالا به قطعات مختلفی نیاز دارد که تأمین‌کنندگان خارجی، آنها را تأمین می‌کنند.



شکل ۱- زنجیره تأمین حلقه - بسته مدنظر

هر تأمین‌کننده، قطعات اولیه را با سطح کیفیت (سطوح کیفیت A, B, C) و قیمت‌های متفاوتی عرضه می‌کند. کیفیت کالای تولیدی به کیفیت قطعات اولیه وابسته است و سطح کیفیت تولید در تعیین نرخ بازگشتی مؤثر است. توزیع‌کنندگان، تقاضای مشتریان را دریافت می‌کنند و در صورت موجود بودن کالا در انبار به تقاضای آنها پاسخ داده می‌شود و در غیر این صورت، توزیع‌کننده با کمبود مواجه می‌شود که در دوره‌های بعدی، جبران‌پذیر است. در صورت معیوب بودن کالا، مشتریان می‌توانند کالاها را به مراکز جمع‌آوری تحویل دهند و در مقابل آن، کالاهای نو دریافت کنند. کالاها در مراکز جمع‌آوری بازرسی می‌شود و اگر کالا بازیابی‌پذیر (تعمیر یا دمونتاژ) باشد، به بخش تعمیرات و دمونتاژ در کارخانه فرستاده می‌شود. براساس تجربه، به‌طور متوسط، $1-\beta$ درصد از کالاهای فرستاده‌شده به کارخانه، تعمیرشدنی است و در صورتی که کالا قابلیت تعمیر نداشته باشد، به بخش دمونتاژ فرستاده می‌شود. در

بخش دمونتاز نیز ۷ درصد از قطعات، قابلیت نوسازی مجدد را دارد. کالاهای تعمیرشده، وارد انبار کالای نهایی تولیدکننده می‌شود و قطعات حاصل از دمونتاز، وارد انبار قطعات اولیه تولیدکننده می‌شود. نرخ بازگشتی، وابسته به میزان تولید و سطح کیفیت تولید در نظر گرفته شده است؛ به این صورت که هرچه سطح تولید، بیشتر باشد (در سطح کیفیت ثابت)، نرخ بازگشتی نیز زیاد خواهد بود و هرچه کیفیت بهتر باشد (در سطح تولید ثابت)، نرخ بازگشتی کمتر خواهد بود. در جدول‌های شماره ۲ و ۳، اندیس‌ها، پارامتر و متغیرهای مسئله معرفی شده است.

جدول ۲- مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$J = [1, \dots, N]$	اندیس مجموعه تأمین‌کنندگان	j
$I = [1, 2]$	اندیس مجموعه سطوح زنجیره	i
$I' = [1, \dots, 3]$	اندیس مجموعه سطوح زنجیره معکوس - جمع‌آوری - تعمیر - دمونتاز	i'
$T = [1 \dots T]$	اندیس مجموعه دوره‌ها	t
$K = [1 \dots M]$	اندیس مجموعه قطعه‌ها	k

جدول ۳- متغیرها و پارامترها مدل ارائه شده

متغیرها		پارامترها	
y_t	مقدار فروش در دوره t	c_t	هزینه تولید هر واحد محصول در دوره t
x_{kjt}	مقدار خرید قطعه نوع k از تأمین‌کننده j در دوره t	π	قیمت فروش هر واحد کالا
X_t	مقدار تولید کالا در دوره t	NP	حداکثر ظرفیت تولید برای تولیدکننده
Q_t	مقدار سفارش توزیع‌کننده به تولیدکننده در دوره t	$MaxDisa$	حداکثر ظرفیت دمونتاز در هر دوره
l_{it}	مقدار کالای موجود در انبار در دوره t برای عنصر i	$MaxRP$	حداکثر ظرفیت تعمیر در یک دوره
I_{kt}	مقدار قطعه k ام در دوره t در انبار تولیدکننده.	$MaxRef_k$	حداکثر ظرفیت نوسازی قطعه نوع k
S_{it}	مقدار سفارش‌های عقب‌افتاده عنصر i زنجیره در دوره t	p_{kj}	هزینه خرید هر واحد قطعه k از تأمین‌کننده j
F_t	پاسخ به سفارش توزیع‌کننده در دوره t (فرستادن کالا)	D_t	تقاضای محصول نهایی در دوره t ام
R_t	مقدار بازگشتی کالاها در دوره t	h_i	هزینه نگهداری هر واحد محصول برای عنصر i ام.
RI_{it}	موجودی کالای بازگشتی در سطح i' زنجیره بازگشتی	h'_k	هزینه نگهداری هر واحد قطعه k ام در انبار تولیدکننده
Q'_t	تعداد کالایی که در دوره t برای بازیابی به کارخانه فرستاده می‌شود.	Bc_t	هزینه کمبود هر واحد کالا در سطح i زنجیره
$Scrap_{kt}$	تعداد قطعات نوع k امحاشده در دوره t	Rc	هزینه تعمیر هر واحد کالای تعمیرپذیر
IRf_{kt}	موجودی قطعه k ام قابل نوسازی در دوره t	Dc	هزینه دمونتاز هر واحد کالای قابل دمونتاز
Rp_t	تعداد کالاهای تعمیرشده در دوره t	$dtsp$	هزینه امحای هر واحد کالای بازگشتی
LTM	زمان آماده‌سازی سفارش برای تولیدکننده	a_k	تعداد قطعه نوع k در هر کالا - ضریب مصرف
Dis_t	تعداد کالاهای دمونتازشده در دوره t	A_i	هزینه سفارش‌دهی یا راه‌اندازی برای سطح i ام زنجیره
Ref_{kt}	تعداد قطعات نوع k نوسازی شده در دوره t	$Ar_{i'}$	هزینه ثابت راه‌اندازی بخش i' زنجیره بازگشتی
B_{it}	متغیر باینری - اگر در دوره t سفارش‌دهی و یا راه‌اندازی در سطح i ام زنجیره اتفاق بیفتد، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	$Aref_k$	هزینه راه‌اندازی بخش نوسازی برای قطعه k
$B'_{i't}$	متغیر باینری: اگر سطح i' در دوره t راه‌اندازی شود، برابر ۱، در غیر این صورت، صفر است.	$Refcost_k$	هزینه نوسازی هر واحد قطعه نوع k

متغیرها	پارامترها
متغیر باینری: اگر در دوره t از تأمین کننده z قطعه k خریداری شود، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	Sc_k هزینه امحای هر واحد قطعه نوع k
متغیر باینری - در صورت راه اندازی بخش نوسازی برای قطعه k ، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	α درصد کالاهای تعمیر و دمونتاژشدنی
سطح کیفیت کالای تولیدی در دوره t	β درصد کالاهای تعمیرشدنی فرستاده شده به کارخانه
سطح کیفیت قطعات نوع k در دوره t	γ_k درصد قطعات قابل نوسازی نوع k
مقدار سفارش ثابت در سیاست موجودی (Q,R) برای عضو i م زنجیره	M عددی بسیار بزرگ
نقطه سفارش مجدد (R) در سیاست موجودی (Q,R) در عضو i م زنجیره	$supmax_{kj}$ حداکثر ظرفیت تأمین قطعه k از طرف تأمین کننده z
متغیر باینری در صورتی که کیفیت کالا تولیدی در سطح A باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	$supmin_{kj}$ حداقل مقدار خرید قطعه k از تأمین کننده z
متغیر باینری در صورتی که کیفیت کالا تولیدی در سطح B باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	τ متوسط زمان بازگشت کالا
متغیر باینری در صورتی که کیفیت کالا تولیدی در سطح C باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	squ_j کیفیت ارائه شده توسط تأمین کننده z (سه سطح $A=3, B=2, C=1$)
اگر سطح موجودی در تولیدکننده از مقدار R کمتر شود، برابر ۱ و در غیر این صورت، صفر است.	a_1 ضریب بازگشتی برای کالاها با کیفیت A
مقدار تولیدات عقب افتاده در انتهای دوره t	a_2 ضریب بازگشتی برای کالاها با کیفیت B
برنامه ریزی تولید در دوره t	a_3 ضریب بازگشتی برای کالاها با کیفیت C

مفروضات مدل پیشنهادی به شرح ذیل است:

۱. تقاضا در ماه‌های مختلف، متفاوت است.
۲. تمامی پارامترها قطعی است.
۳. کمبود کالا به صورت پس‌افت است.
۴. در قیمت کالا و سایر پارامترهای هزینه، تخفیف وجود ندارد.
۵. زمان تدارک، قطعی و ثابت است.
۶. افق زمانی نامحدود در نظر گرفته شده است.
۷. مدل مدنظر حلقه - بسته، دوسطحی و تک‌کالایی است.
۸. هر تأمین کننده، قطعات را با سه سطح کیفیت و قیمت‌های متفاوت عرضه می‌کند.
۹. کیفیت کالاهای تولیدی به کیفیت قطعات اولیه وابسته است.
۱۰. کالاهای تعمیری، ارزش کالاهای نو را دارد.

بر این اساس، مدل توسعه داده شده به شرح ذیل تشریح می‌شود:

تابع هدف این زنجیره، عبارت است از به حداکثر رساندن سود عملیاتی که برابر است با فروش منهای حاصل جمع هزینه‌های تولید، هزینه‌های موجودی و هزینه‌های جریان بازگشتی. هزینه‌های تولید عبارت است از هزینه راه‌اندازی و هزینه‌های وابسته به سطح تولید. هزینه‌های موجودی عبارت است از هزینه‌های نگهداری موجودی در انبارها، هزینه‌های مربوط به سفارش‌دهی کالا و هزینه‌های مربوط به سفارش‌های عقب‌افتاده. هزینه جریان بازگشتی نیز عبارت است از هزینه بازگشت کالا و هزینه‌های تعمیر، دمونتاژ و هزینه‌های نوسازی قطعات حاصل از دمونتاژ.

$$\begin{aligned}
 MaxZ = & \sum_{t \in T} \pi_t \cdot (y_t - R_t) - \sum_{t \in T} c_t \cdot X_t - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} B_{it} \cdot A_i - \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} p_{kjt} \cdot x_{kjt} \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} I_{it} \cdot h_i - \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} I'_{kt} \cdot h'_k - \sum_{t \in T} (R_t \cdot \alpha \cdot disp + Dis_t \cdot Dc + Rp_t \cdot Rc) \\
 & - \sum_{i' \in I'} \sum_{t \in T} B'_{i't} \cdot Ar_{i'} - \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (Refcost_k \cdot Ref_{kt} + Sc_k \cdot Scrap_{kt}) \\
 & - \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} B'_{fkt} \cdot Aref_k - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} S_{it} \cdot Bc_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

محدودیت‌های شماره ۲ تا ۵ تضمین می‌کند که مقدار تولید، تعمیر، دمونتاژ و نوسازی قطعات در هر دوره، به ترتیب از مقدار ظرفیت تولید، ظرفیت تعمیر، ظرفیت دمونتاژ و ظرفیت نوسازی بیشتر نباشد.

$$X_t \leq NP \quad \forall t \tag{2}$$

$$Rp_t \leq MaxRP \quad \forall t \tag{3}$$

$$Dis_t \leq MaxDisa \quad \forall t \tag{4}$$

$$Ref_{kt} \leq MaxRef_k \quad \forall k, t \tag{5}$$

مجموعه محدودیت‌های موجودی روبه‌جلو به شرح ذیل است. این سری از محدودیت‌ها، تضمین می‌کند که روابط موجودی کالاها و قطعات در زنجیره روبه‌جلو رعایت شود.

$$I'_{kt} = I'_{k(t-1)} + \sum_{j \in J} x_{kjt} + Ref_{kt} - a_k \cdot X_t \quad \forall k, t \tag{6}$$

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + X_t + Rp_t - F_t \quad \forall t, i = 1 \tag{7}$$

$$F_t = Q_t - S_{it} + S_{i(t-1)} \quad \forall t, i = 1 \tag{8}$$

$$RS_i \leq PS_t + I_{it} - S_{it} + M \cdot Bp_t \quad \forall t, i = 1 \tag{9}$$

$$PP_{t+1} = \min\{M \cdot Bp_t, QS_i\} \quad \forall t, i = 1 \tag{10}$$

محدودیت شماره ۶ نشان‌دهنده موجودی قطعه k م در دوره t در انبار تولیدکننده است. فرض بر این است که برای تولید هر کالا، تعداد a_k از قطعه نوع k نیاز است. محدودیت شماره ۷ تشریح می‌کند که مقدار موجودی در دوره t از مقادیر موجودی باقیمانده از دوره پیش، مقدار تولید (X_t) و تعمیر (Rp_t) در این دوره و مقدار کالای فرستاده شده به مرکز پخش به مرکز پخش به دست می‌آید. محدودیت شماره ۸ بیان می‌کند که اگر مقدار کالای فرستاده شده به مرکز پخش، کمتر از مقدار سفارش‌ها باشد، مقدار اختلاف به‌عنوان سفارش عقب‌افتاده در نظر گرفته می‌شود. محدودیت شماره ۹ و ۱۰، محدودیت رعایت سیاست موجودی (Q, R) در سطح تولیدکننده است و تضمین می‌کند که اگر سطح موجودی از مقدار مشخصی کمتر آمد، تولید کالا انجام می‌شود. محدودیت شماره ۹ تضمین می‌کند که اگر سطح موجودی کالای نهایی تولیدکننده، کمتر از مقدار RS_i باشد، متغیر باینری Bp_t برابر ۱ خواهد شد. در این صورت، براساس محدودیت شماره ۱۰، میزان سفارش QS_i به برنامه تولید افزوده می‌شود.

$$PP_t = X_t + Ps_t - Ps_{t-1} \quad \forall t \quad (11)$$

$$y_t = D_t - S_{it} + S_{i(t-1)} \quad \forall t, i = 2 \quad (12)$$

$$RS_i \leq S_{(i-1)t} + I_{it} - S_{it} + M \cdot B_{it} \quad \forall t, i = 2 \quad (13)$$

$$Q_{t+1} = \min\{M \cdot B_{it}, QS_i\} \quad \forall t, i = 2 \quad (14)$$

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + F_{t+LTM} - y_t \quad \forall t, i = 2 \quad (15)$$

محدودیت شماره ۱۱ تضمین می‌کند که اگر مقدار تولیدات با محدودیت ظرفیت، کمتر از مقدار برنامه‌ریزی تولید باشد، اختلاف آنها به‌عنوان تولیدات عقب‌افتاده در نظر گرفته شود و در دوره‌های بعد تولید شود. محدودیت شماره ۱۲، مقدار فروش (کالاهای فرستاده شده به مشتریان) را در دوره t محاسبه می‌کند. بدین ترتیب، اگر نتوان بخشی از تقاضا را پوشش داد، این مقدار در سفارش‌های عقب‌افتاده در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت شماره ۱۳ و ۱۴، محدودیت سیاست موجودی (Q, R) در سطح توزیع‌کننده است و تضمین می‌کند که اگر سطح موجودی از مقدار مشخصی کمتر آمد، سفارش کالا انجام شود. محدودیت شماره ۱۳ تضمین می‌کند که هرگاه، سطح موجودی توزیع‌کننده از مقدار RS_i کمتر شود، متغیر باینری، مقدار ۱ بگیرد. در غیر این صورت، به این علت که متغیر باینری در تابع هدف، هزینه اعمال می‌کند، مقدار پیش‌فرض آن برابر صفر است و مدل می‌کوشد این متغیر باینری برابر صفر شود. محدودیت شماره ۱۴ تضمین می‌کند که فقط اگر مقدار متغیر باینری B_{it} برابر ۱ باشد، مقدار سفارش برابر QS_i خواهد بود. محدودیت شماره ۱۵، موجودی کالای توزیع‌کننده را نشان می‌دهد. همچنین، این محدودیت تضمین می‌کند که مقدار کالای فرستاده شده به مرکز پخش، بعد از گذشت زمان LTM به انبار توزیع‌کننده وارد می‌شود. گفتنی است، در این مدل فرض شده است که مقدار LTM به‌صورت یک مقدار عددی (متوسط زمان‌های تدارک) در نظر گرفته شده است.

مجموعه محدودیت‌های موجودی روبه‌عقب به شرح ذیل است. این سری از محدودیت‌ها، تضمین می‌کند که روابط موجودی کالاها و قطعات در زنجیره بازگشتی رعایت شود.

$$RI_{i't} - RI_{i'(t-1)} = R_t \cdot (1 - \alpha) - Q'_t \quad \forall t, i' = 1 \quad (16)$$

$$RI_{i't} - RI_{i'(t-1)} = Q'_t \cdot (1 - \beta) - Rp_t \quad \forall t, i' = 2 \quad (17)$$

$$RI_{i't} - RI_{i'(t-1)} = Q'_t \cdot \beta - Dis_t \quad \forall t, i' = 3 \quad (18)$$

$$IRf_{kt} - IRf_{k(t-1)} = a_k Dis_t - Scrap_{kt} - Ref_{kt} \quad \forall t, k \quad (19)$$

$$Scrap_{kt} \leq (1 - \gamma_k) \cdot a_k \cdot Dis_t \quad \forall k, t \quad (20)$$

محدودیت شماره ۱۶، موجودی کالاهای بازگشتی را در مرکز جمع‌آوری نشان می‌دهد. محدودیت شماره ۱۷، موجودی کالاهای تعمیرپذیر را نشان می‌دهد. محدودیت شماره ۱۸، موجودی بخش دمونتاز را نشان می‌دهد. محدودیت شماره ۱۹، مقدار افزایش در موجودی قطعه نوع k نوسازی‌شدنی در مرکز بازسازی را به نمایش می‌گذارد. محدودیت شماره ۲۰، مقدار قطعات زاید حاصل از دمونتاز را نشان می‌دهد. قطعاتی که قابلیت نوسازی را نداشته باشد، از سیستم خارج می‌شود.

دسته بعد، مجموعه محدودیت‌های مرتبط با نرخ بازگشتی و کیفیت را به نمایش می‌گذارد. در این مدل‌سازی فرض می‌شود قطعات، کیفیت‌های متفاوتی دارد و کیفیت هر کالای تولیدشده با توجه به سطح کیفیت قطعات آن تعیین می‌شود. قطعات در سه سطح کیفی A, B, C ارائه می‌شود و کالاهای تولیدشده حاصل از آنها نیز همان کیفیت را دارد. براساس نظر کارشناسانه فرض می‌شود کالاهایی با سطح کیفیت A، نرخ بازگشتی a درصد و کالاهای تولیدی در سطح B، نرخ بازگشتی b درصد و کالاهای با سطح کیفیت C، نرخ بازگشتی c درصد دارد. برای مدل‌سازی، ابتدا باید سطح کیفیت قطعه نوع k در دوره t تعیین شود؛ به این صورت که کیفیت قطعه خریداری‌شده، به تأمین‌کننده وابسته است و اگر قطعه در دوره t از تأمین‌کننده تأمین شود، سطح کیفیت کلی قطعات نوع k در آن دوره، برابر با حداقل سطح کیفیت ارائه‌شده توسط تأمین‌کنندگان آن خواهد بود.

$$qu_{kt} = \min\{squ_j | x_{kjt} > 0, qu_{k(t-1)} | I'_{k(t-1)} > 0\} \quad \forall k, t \quad (21)$$

$$Qu_t = \min\{qu_{kt} | k \in K\} \quad \forall t \quad (22)$$

$$Qu_t = 3 \cdot QuA_t + 2 \cdot QuB_t + 1 \cdot QuC_t \quad \forall t \quad (23)$$

$$QuA_t + QuB_t + QuC_t = 1 \quad \forall t \quad (24)$$

$$R_{t+\tau} \geq a_1 \cdot X_t - M \cdot (1 - QuA_t) \quad \forall t \quad (25)$$

$$R_{t+\tau} \geq a_2 \cdot X_t - M \cdot (1 - QuB_t) \quad \forall t \quad (26)$$

$$R_{t+\tau} \geq a_3 \cdot X_t - M \cdot (1 - QuC_t) \quad \forall t \quad (27)$$

محدودیت شماره ۲۱، سطح کیفیت قطعه نوع k در انبار تولیدکننده را نشان می‌دهد و نشان می‌دهد سطح کیفیت قطعه نوع k در هر دوره برابر است با حداقل سطح کیفیت قطعات خریداری شده و یا سطح کیفیت قطعات باقیمانده از دوره پیش. محدودیت شماره ۲۲، سطح کیفیت کالاهای تولیدی را تعیین می‌کند و نشان می‌دهد سطح کیفیت کالاهای تولیدی در هر دوره، برابر با حداقل سطح کیفیت قطعات تشکیل دهنده آن کالا است. با تعیین مقدار Qu_t با رابطه شماره ۲۲ می‌توان برای فعال‌سازی متغیرهای باینری در محدودیت شماره ۲۳ تصمیم‌گیری کرد. محدودیت شماره ۲۴، تضمین می‌کند که در یک دوره فقط یکی از متغیرهای باینری فعال شود. این متغیرهای باینری در محدودیت‌های شماره ۲۵ تا ۲۷ قرار می‌گیرد و به این علت که در هر دوره فقط یکی از آنها برابر ۱ می‌شود، در هر دوره، یکی از محدودیت‌های شماره ۲۵ تا ۲۷ فعال خواهد شد.

دسته بعدی محدودیت‌ها، مجموعه محدودیت‌های مرتبط با آثار فعال‌بودن/نبودن متغیرهای باینری بر سایر متغیرهاست که به شرح ذیل ارائه شده است:

$$X_t \leq M \cdot B_{it} \quad \forall t, i = 1 \quad (28)$$

$$Q'_{i't} \leq M \cdot B'_{i't} \quad \forall t, i' = 1 \quad (29)$$

$$Rp_t \leq M \cdot B'_{i't} \quad \forall t, i' = 2 \quad (30)$$

$$Dis_t \leq M \cdot B'_{i't} \quad \forall t, i' = 3 \quad (31)$$

$$Ref_{kt} \leq M \cdot Br_{fkt} \quad \forall t, k \quad (32)$$

محدودیت شماره ۲۸ تضمین می‌کند اگر مقدار تولید در دوره t مثبت باشد، الزاماً متغیر باینری مربوط به راه‌اندازی خط تولید نیز فعال می‌شود. محدودیت شماره ۲۹ تضمین می‌کند اگر کالای مرجوعی از مرکز جمع‌آوری برای تعمیر و یا دمونتاز به کارخانه فرستاده شود، مقدار متغیر باینری، نشان‌دهنده راه‌اندازی بخش جمع‌آوری فعال شود. به همین ترتیب، محدودیت شماره ۳۰ و ۳۱ نشان می‌دهد به ترتیب، اگر در دوره t تعمیر/دمونتازی انجام شود، متغیر باینری راه‌اندازی بخش تعمیر/دمونتاز فعال می‌شود. در نهایت، محدودیت شماره ۳۲ تضمین می‌کند اگر در دوره t ، قطعات نوع k نوسازی شود، متغیر باینری مربوط به بخش k ام، قسمت نوسازی فعال می‌شود. علاوه بر موارد مذکور، محدودیت‌هایی نیز برای تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده است.

$$x_{kjt} \leq \sup \max_{kj} \cdot pur_{kjt} \quad \forall k, j, t \quad (33)$$

$$x_{kjt} \geq \sup \min_{kj} \cdot pur_{kjt} \quad \forall k, j, t \quad (34)$$

محدودیت شماره ۳۳ نشان می‌دهد هر تأمین‌کننده با محدودیت عرضه روبروست و همچنین تضمین می‌کند اگر در دوره t از تأمین‌کننده j قطعه k خریداری شود، متغیر باینری مربوط به آن فعال می‌شود. محدودیت شماره ۳۴ تضمین می‌کند اگر تصمیم گرفته شود از تأمین‌کننده j ، قطعه k ام خریداری شود، مقدار خرید کالا باید از حداقلی که وابسته به تأمین‌کننده و نوع قطعه است، بیشتر باشد.

در نهایت، سری محدودیت‌های شماره ۳۵ نیز مثبت بودن و یا باینری بودن متغیرها را به نمایش می‌گذارد.

$$y_t, R_t, X_t, x_{kj,t}, I_{it}, I'_{kt}, S_{it}, Dis_t, Rp_t, Ref_{kt}, Scrap_{kt} \geq 0 \quad \forall t, k, j, i' \quad (35)$$

$$F_t, Q_t, Ps_t, PP_t, Rs_i, Qs_i, RI'_{i't}, Q'_t, IRf_{kt}, qu_{kt}, Qu_t \geq 0 \quad \forall t, k, j, i'$$

$$B_{it}, B'_{i't}, Brf_{kt}, Bp_t, QuA_t, QuB_t, QuC_t, pur_{kj,t}, Brf_{kt} \in \{0,1\} \quad \forall t, k, j, i'$$

۴- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش، پژوهشی نظری از نوع کاربردی است و برای بررسی یکی از معضلات اصلی سیستم‌های تولیدی انجام شده است. متأسفانه، در سال‌های اخیر، شرایط سخت اقتصادی، تحریم‌ها، مشکلات ارزی و ... موجب شده است تأمین‌کنندگان به جای تهیه قطعات و مواد اولیه با کیفیت و عملکرد مناسب، به محصولات و مواد اولیه‌ای رو آورده‌اند که عملکرد یا کیفیت ضعیف‌تری دارد. این قطعات و مواد اولیه سطح پایین، در هنگام تولید، تأثیر خود را بر محصولات تولیدشده نیز می‌گذارد و سطح کیفی محصولات تولیدی را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه، نرخ بازگشتی محصولات افزایش می‌یابد و هزینه و زیان آن متوجه شرکت می‌شود؛ بنابراین، همانند آنچه در دنیای واقعی اتفاق می‌افتد، شرکت تولیدی مجبور به انتخاب ترکیبی از قطعات با کیفیت‌های مختلف از تأمین‌کنندگان است؛ به گونه‌ای که سود شرکت را به حداکثر برساند. به‌طور طبیعی، برای حل چنین مسئله بهینه‌سازی به مدل‌سازی ریاضی نیاز است و این مدل‌سازی ریاضی، تمامی جنبه‌های فرایند تولید را دربرمی‌گیرد.

بر این اساس، برای پاسخ به پرسش‌هایی همچون

- پایین بودن سطح کیفیت مواد اولیه، چه تأثیری بر هزینه‌های کلی و هزینه‌های جریان معکوس دارد؟
 - برای به حداقل رساندن هزینه‌های کلی زنجیره، قطعات خریداری‌شده باید در چه سطح کیفی باشد؟
 - رابطه هزینه‌های کیفیت و تعمیر و انتخاب تأمین‌کنندگان چگونه است؟
 - مقدار سفارش‌های بهینه بین اعضای زنجیره چه مقدار است؟
 - رابطه کیفیت مواد ورودی و نرخ بازگشتی‌ها به چه صورت است؟
 - سیاست‌های موجودی مربوط به جریان مستقیم و معکوس برای زنجیره تأمین مذکور چگونه است؟
- توسعه داده شده است.

هدف‌های اصلی این پژوهش، ارائه بستر تصمیم‌گیری مناسب برای تعیین سیاست‌های بهینه در یک زنجیره حلقه

- بسته است. هدف‌های علمی آن عبارت است از:

- ارائه مدل ریاضی زنجیره تأمین دوسطحی حلقه - بسته با در نظر گرفتن تأثیر سطح کیفیت محصولات بر نرخ بازگشتی؛
- تعیین تصمیم‌های مربوط به سیاست‌های کنترل موجودی روبه‌جلو و روبه‌عقب زنجیره و سیاست‌های خرید مواد اولیه؛

- ارائه بستر پژوهشی برای حالت‌هایی که کیفیت به‌عنوان عامل بر نرخ بازگشتی تأثیرگذار است؛
- ارائه روش حل کارا و مؤثر برای تحلیل مدل‌های ارائه‌شده و اعتبارسنجی حل‌های به‌دست‌آمده.

نوآوری اصلی این پژوهش، در نظر گرفتن سطح کیفیت برای قطعات اولیه و تأثیر غیرمستقیم آن بر نرخ بازگشتی است؛ به این صورت که سطح کیفیت قطعات اولیه، سطح کیفیت کالای ساخته شده را تعیین می‌کند و سطح کیفیت کالای تولیدی بر نرخ بازگشتی تأثیرگذار است. به این منظور، از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح برای فرموله کردن و حل مسئله استفاده شده است. همچنین بازارهای پخش کالا، چندگانه در نظر گرفته شده است که هر کدام، تقاضای مستقل دارد. همچنین، در مدل‌سازی زنجیره معکوس، هر بخش می‌تواند به صورت مستقل راه‌اندازی شود و تمامی بخش‌ها هم‌زمان فعال نمی‌شود.

نتایج این پژوهش را در طراحی سیاست‌های خرید مواد اولیه زنجیره‌های تأمین حلقه - بسته (مانند بسیاری از شرکت‌هایی که کالاهای خود را گارانتی تعمیر و یا تعویض می‌کنند) می‌توان به کار برد. به‌طور مشخص، به زنجیره‌های تأمین حلقه - بسته‌ای می‌توان توجه کرد که در آنها بازگشتی‌ها به صورت محسوس با سطح کیفیت کالاهای تولید رابطه دارد. همچنین، این مدل‌سازی، مخصوص سازمانی‌هایی است که کالا در عمر میانی و یا ابتدایی خود قرار داد و به کار بردن سیاست‌های مناسب، مزیت رقابتی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، نتایج این پژوهش، می‌تواند در توسعه مدل‌های موجود در سطح دانشگاهی و واقعی تر شدن مدل‌های ریاضی در این حوزه استفاده شود.

۵- مطالعه موردی و یافته‌ها

۵-۱- اطلاعات و داده‌های مسئله

مدل ارائه شده در این مقاله به صورت مدل‌سازی ریاضی عدد صحیح مختلط است که یکی از کاراترین نرم‌افزارها برای حل اینگونه مسائل، نرم‌افزار GAMS/Cplex است؛ بنابراین، مدل مدنظر در نرم‌افزار GAMS کدنویسی شد و برای حل این مسئله، روش MIP^{16} در حل‌کننده Cplex-12 به کار رفت. در روش MIP از الگوریتم شاخه و کران استفاده می‌شود که در آن، مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به چندین برنامه‌ریزی خطی تبدیل می‌شود و در هر شاخه، یک مدل برنامه‌ریزی خطی حل می‌شود. برای انجام دادن محاسبات از پردازنده Intel Core i5¹⁷ و حافظه رم¹⁸ ۸ گیگابایت بر سیستم عامل ویندوز ۱۰ نسخه ۶۴ بیتی استفاده شده است. فرض می‌شود هر سال از ۱۰ دوره ماهیانه مفید تشکیل شده است و مقادیر حداکثر و حداقل خرید قطعات برای تمامی تأمین‌کنندگان، به ترتیب برابر ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰ واحد است. اطلاعات مربوط به سایر پارامترهای مسئله در جدول‌های شماره ۴ تا ۱۲ در پیوست الف ارائه شده است. گفتنی است، اطلاعات تقاضا براساس داده‌های فروش دوره‌های گذشته و با به‌کارگیری یک مدل پیش‌بینی منطبق با داده‌های پیشین حاصل شده است.

۵-۲- نتایج حل مدل

متغیرهای اصلی، که تعیین‌کننده سیاست‌های خرید و کنترل موجودی است، در جدول شماره ۴ ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار سفارش اقتصادی تولیدکننده، ۴۵۲۰۴ واحد و نقطه سفارش مجدد وی، ۵۰۰۰ واحد است. همچنین، مقدار سفارش اقتصادی توزیع‌کننده، برابر ۱۱۹۶۴ واحد است و نقطه سفارش مجدد وی، ۷۸۲۷ واحد به دست آمده است. مقدار بهینه تابع هدف نیز برابر با ۱۸۳۷۳۸۶۸۸/۹ واحد پولی به دست آمده است.

جدول ۴- مقادیر سفارش و مقدار سفارش مجدد برای تولید کنندگان و توزیع کنندگان

I	۱	۲
Q	۴۵۲۰۴	۱۱۹۴۶
R	۵۰۰۰	۷۸۲۷

جدول شماره ۵ نشان می‌دهد در دوره‌های چهارم تا هشتم، خریدهای انجام شده از تأمین‌کننده اول بوده است که سطح کیفیت A دارد و فقط در دوره سوم از تأمین‌کننده سوم (سطح کیفیت C) خرید انجام شده است.

جدول ۵- خرید قطعات اولیه در دوره‌های مختلف برای مدل قطعی

K	j	T				
		۳	۴	۵	۶	۸
۱	۱	۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۹۷۵۶
۱	۳	۱۴۰۰۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱	۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۹۷۵۶
۲	۳	۱۴۰۰۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱	۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۹۸۵۶
۳	۳	۱۴۰۰۰	۰	۰	۰	۰
۴	۱	۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۹۶۵۶
۴	۳	۱۴۰۰۰	۰	۰	۰	۰

جدول شماره ۶ نشان‌دهنده فروش کالای نهایی در هر یک از بازارهاست. در دوره اول فروش در هر مرکز توزیع، برابر ۱۰۰۰ واحد کالا است که در همه جدول‌ها مربوط به فروش یکسان است؛ زیرا موجودی اول دوره در مرکز توزیع، برابر ۱۰۰۰ واحد در نظر گرفته شده است.

جدول ۶- فروش در هر بازار در مدل قطعی

T	۱	۳	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
y	۱۰۰۰	۵۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۷۸۳	۱۱۹۴۶	۱۱۹۴۶

جدول شماره ۷، مقدار تولید در هر دوره و سطح کیفیت تولید در آن دوره را نشان می‌دهد. با توجه به جدول مشاهده می‌شود در دوره‌های سوم تا هفتم، تولید با حداکثر ظرفیت انجام شده و در دوره هشتم، کمتر از ظرفیت بوده است. سطح کیفیت تولید در بیشتر دوره‌ها در سطح A است و فقط در دوره سوم کیفیت در سطح C قرار دارد.

جدول ۷- تولید و سطح کیفیت تولید در دوره‌های مختلف در مدل قطعی

T	۳	۴	۵	۶	۷	۸
X	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	۹۲۰۴
Qu	C	A	A	A	A	A

جدول‌های شماره ۸ و ۹، سفارش در دوره‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به سیاست کنترل موجودی (Q_t) اعمال شده در مدل، تمامی سفارش‌های مربوط به یک مرکز توزیع، مقدار برابری دارند؛ ولی مشاهده می‌شود که میزان سفارش‌های عقب‌افتاده در زنجیره، سطوح متفاوتی را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۸- سفارش در دوره‌های مختلف در مدل قطعی

T	۲	۳	۴	۶	۸	۹
Q_t	۱۱۹۴۵/۷	۱۱۹۴۵/۷	۱۱۹۴۵/۷	۱۱۹۴۵/۷	۱۱۹۴۵/۷	۱۱۹۴۵/۷

جدول ۹- سفارش‌های عقب‌افتاده در دوره‌های مختلف

S_{it}		T								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
I	۱	۰	۶۹۴۵/۷	۱۸۸۹۱/۳	۱۶۸۳۷	۲۸۳۷	۷۸۲/۷	۰	۰	۰
	۲	۵۹۸۴	۱۲۳۲۹	۱۴۷۸۱	۲۱۵۳۱	۱۴۴۸۰	۶۶۶۲	۱۷۵۹	۷۱۳۰/۳	۴۱۱۸/۷

جدول شماره ۱۰، مقدار نرخ بازگشتی در هر دوره را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، نرخ بازگشتی از دوره پنجم مقدار می‌گیرد و این به علت وجود فرض اختلاف فاز دو دوره‌ای بین تولید و تأثیر آن بر نرخ بازگشتی است (تولید از دوره سوم شروع شده است).

جدول ۱۰- نرخ بازگشتی در دوره‌های مختلف در مدل قطعی

T	۶	۷	۸	۹	۱۰
R_t	۲۸۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۴۶۰/۲

۶- بحث

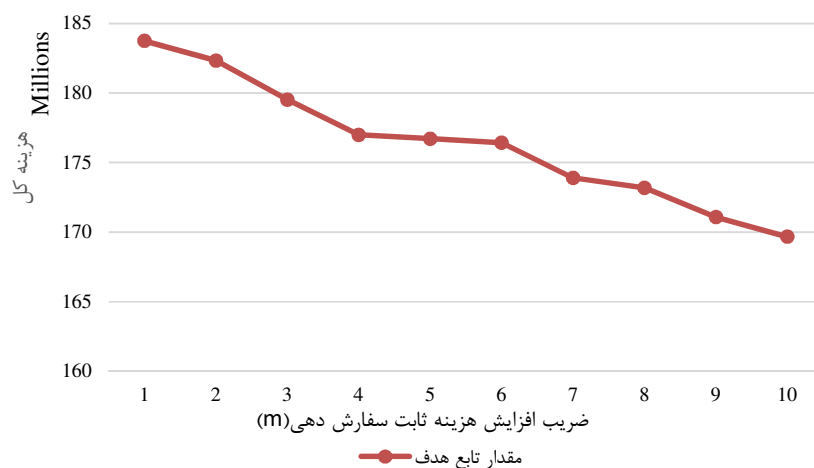
۶-۱- مقایسه نتایج با وضعیت کنونی شرکت

با مقایسه داده‌های مالی اعلام شده توسط شرکت با نتایج به دست آمده از مدل، مدل، بهبود ۳/۳۷ درصدی را در تابع هدف به نمایش می‌گذارد. ضمن آنکه در وضعیت کنونی، قطعات خریداری شده از تأمین کننده دوم و در سطح کیفی B انجام می‌شود و سیستم سفارش دهی براساس پیش‌بینی تقاضای دوره آینده با لحاظ کردن سفارش‌های عقب‌افتاده عمل می‌کند؛ حال آنکه در حالت بهینه، بیشتر خریدهای انجام شده برای قطعات از نوع A است. البته این مسئله موجب افزایش هزینه ناشی از بهبود کیفیتی به میزان ۱۲۴۷۴۶۴۰/۶ واحد می‌شود؛ اما در عین حال، کاهش هزینه ناشی از کاهش نرخ بازگشتی به میزان ۱۸۶۶۳۶۸۱/۷ واحد پولی نیز ایجاد می‌شود که به میزان ۶۱۸۹۰۴۱/۱ واحد پولی، کاهش هزینه ایجاد شده با افزایش سطح کیفیت تولید را نشان می‌دهد.

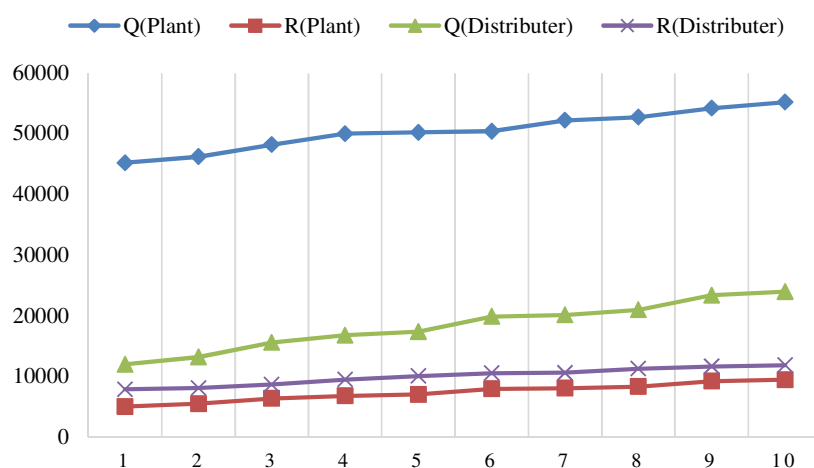
۲-۶- تحلیل حساسیت

برای بررسی میزان پایداری مدل به حساسیت دو پارامتر اساسی مدل (هزینه ثابت سفارش‌دهی و هزینه‌های سفارش‌های عقب‌افتاده توزیع‌کنندگان) بر تابع هدف، مقدار بهینه سفارش‌دهی و نقطه سفارش مجدد توجه می‌شود. هزینه سفارش‌دهی ثابت در صورت سفارش کالا از سوی توزیع‌کنندگان به تولیدکننده، در تابع هدف اعمال می‌شود و از مقدار سفارش، مستقل است (A_i). نمودار شماره ۲، تأثیر افزایش هزینه ثابت سفارش‌دهی بر تابع هدف را نشان می‌دهد. نمودار شماره ۳، تأثیر افزایش هزینه ثابت سفارش‌دهی بر مقادیر بهینه سفارش (Q) و نقطه سفارش مجدد (R) را برای تولیدکننده (Plant) و توزیع‌کننده (Distributer) نشان می‌دهد. در این حالت، مقادیر هزینه ثابت سفارش برای توزیع‌کنندگان با ضریب m افزایش می‌یابد.

$$A_{i(new)} = A_{i(base)} * m \quad \forall i, m = \{1, 2, \dots, 10\} \quad (36)$$



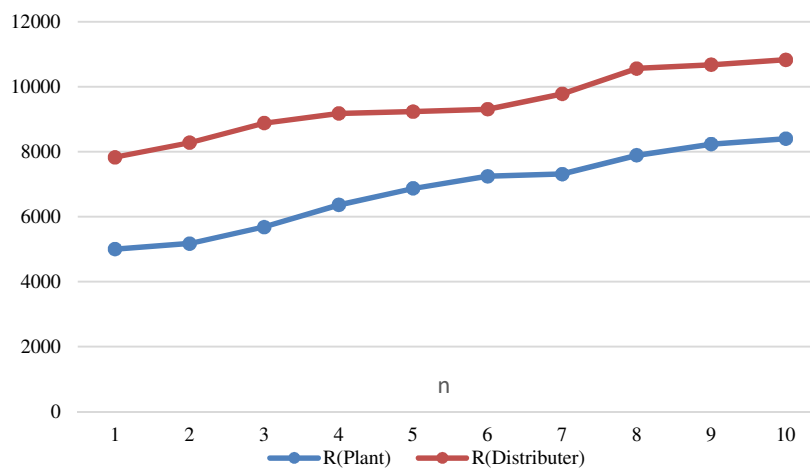
شکل ۲- تأثیر افزایش هزینه ثابت سفارش‌دهی بر تابع هدف



شکل ۳- تأثیر افزایش هزینه‌های ثابت سفارش‌دهی بر سفارش اقتصادی و نقطه سفارش مجدد

هزینه سفارش عقب افتاده توزیع کنندگان در صورت پاسخ ندادن به تقاضای مشتری، به سیستم اعمال می شود (BC_i). نمودار شماره ۴، تأثیر افزایش هزینه سفارش های عقب افتاده را بر نقطه سفارش مجدد تولیدکننده و توزیع کننده نشان می دهد. در این حالت نیز مقادیر هزینه سفارش های عقب افتاده برای توزیع کنندگان با ضریب n افزایش می یابد.

$$BC_{i(new)} = BC_{i(base)} * n \quad \forall i, n = \{1, 2, \dots, 10\} \quad (37)$$



شکل ۴- تأثیر افزایش هزینه کمبود بر مقادیر نقطه سفارش مجدد

نمودار شماره ۴، به خوبی نشان می دهد با افزایش هزینه های سفارش های عقب افتاده، مقادیر نقطه سفارش مجدد افزایش می یابد که با توجه قوانین موجود در کنترل موجودی، پیش بینی پذیر است. با افزایش هزینه کمبود سیستم، مدل، مقادیر نقطه سفارش را افزایش می دهد تا در دوره های مختلف در صورت امکان با کمبود مواجه نشود.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل ریاضی مسئله کنترل موجودی زنجیره تأمین حلقه - بسته دوسطحی چنددوره ای با در نظر گرفتن انتخاب تأمین کننده و تأثیر سطح کیفیت تولید بر نرخ بازگشتی توسعه داده شده است و فرض بر این است که مشتریان در صورت معیوب بودن کالا می توانند کالا را به مراکز جمع آوری تحویل دهند و کالای نو دریافت کنند و مقدار بازگشتی در هر دوره، وابسته به سطح تولید و سطح کیفیت تولید در نظر گرفته شده است. مدل سازی نهایی به صورت برنامه ریزی عدد صحیح خطی انجام شده است و با استفاده از داده های مورد مطالعاتی برای حل مدل ارائه شده از نرم افزار GAMS و از حل کننده Cplex استفاده شده و نتایج حاصل درباره سیاست های کنترل موجودی زنجیره و شبکه معکوس بررسی شده است.

وجه نوآوری این پژوهش در آن است که اثر کیفیت مواد اولیه ای را که تأمین کنندگان تهیه کرده اند، بر تولید و بر کالاهای بازگشتی در نظر می گیرد. همانگونه که در بخش پیشینه پژوهش مشاهده شد، پژوهش های فراوانی (حتی در سال های اخیر) درباره موضوع کیفیت تولید انجام شده؛ اما تاکنون، در مطالعه ای به این موضوع توجه نشده است. شاید این موضوع را موضوعی بومی بتوان به شمار آورد؛ زیرا ممکن است محدودیت ها و مشکلات تأمین مواد اولیه

(که در بخش روش‌شناسی گفته شد)، در بسیاری از کشورها وجود نداشته باشد؛ حال آنکه این موضوع، معضلی جدی برای تولیدکنندگان داخلی است. به‌ویژه، مخاطب اصلی این پژوهش، تولیدکنندگانی هستند که محصول آنها مونتاژی است یا قابلیت بازتولید دارد؛ بنابراین، قطعات بازگشتی را می‌توان پس از انجام‌دادن عملیات بازیافت، به چرخه تولید بازگرداند که با توجه به میان‌رده‌بودن صنایع تولیدی در ایران و وابستگی زیاد آنها به مواد اولیه، این موضوع، جذابیت زیادی برای این صنایع دارد.

درنهایت، برای اعتبارسنجی مدل، تحلیل حساسیت بر پارامترهای مهم مدل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد برای نمونه مدنظر این پژوهش، خرید قطعات در سطح کیفیت A، با وجود افزایش هزینه‌های خرید، به کاهش نرخ بازگشتی و درنتیجه، افزایش سوددهی زنجیره منجر می‌شود.

به‌عنوان پیشنهاد کاربردی، تولیدکنندگان می‌توانند با استفاده از این مدل بهینه‌سازی از نظر عملیاتی و اجرایی:

- ۱- میزان خرید مواد اولیه را از هر تأمین‌کننده در هر دوره مشخص کنند. همچنین، مدل مشخص می‌کند که خرید انجام‌شده، چه سطح کیفیتی (مثلاً بین A تا C) داشته باشد (مشابه جدول شماره ۵)؛
 - ۲- تعیین کنند در هر دوره، چه میزان محصول نهایی و با چه کیفیتی تولید کنند (مشابه جدول شماره ۷)؛
 - ۳- مشخص کنند میزان سفارش‌های توزیع‌کنندگان به آنها در هر دوره چقدر خواهد بود و به چه میزان، دچار سفارش‌های عقب‌افتاده می‌شوند (مشابه جدول‌های شماره ۸ و ۹) و
 - ۴- با اتخاذ چنین سیاست‌هایی، چه مقدار کالای بازگشتی در هر دوره دارند (مشابه جدول شماره ۱۰).
- بدین ترتیب، مشاهده می‌شود که حل مدل، برنامه‌ی جامعی را برای تولیدکننده در ابعاد مختلف تولید کالا فراهم می‌آورد.

البته مدل ریاضی، علاوه بر کمک به تولیدکننده برای استخراج اطلاعات متغیرهای تصمیم مرتبط با وی، اطلاعاتی نیز درباره سایر اعضا و جریان‌های زنجیره همچون میزان فروش، موجودی محصولات و موجودی کالاهای بازگشتی، تعداد و نوع قطعات بازگشتی، نحوه تخصیص اعضای زنجیره به یکدیگر، بازگشایی کردن/نکردن سطوح زنجیره مستقیم و معکوس (جمع‌آوری، تعمیر، مونتاژ) و مراکز بازسازی و ... را در هر دوره ارائه می‌کند. از توسعه‌های بعدی این مدل، می‌توان به استفاده از تقاضای احتمالی همراه با پارامترهای فازی در مدل اشاره کرد. همچنین، می‌توان با افزودن هماهنگی میان اعضای یک زنجیره تأمین، به سودآوری بیشتری برای همه اعضا دست یافت. علاوه بر این، به افزودن فرض‌هایی همچون چندکالایی بودن زنجیره و یا وجود ارتباط بین سطوح موازی توزیع‌کنندگان می‌توان توجه کرد. ضمن آنکه در حالت چندکالایی، قیمت‌های فروش متفاوتی را برای محصولات می‌توان در نظر گرفت. درنهایت، استفاده از توابع غیرخطی (با داده‌های واقعی) برای بیان رابطه سطح کیفیت و نرخ بازگشتی از جمله موضوعات پیشنهادی برای پژوهش‌های بعدی است.

- Benkherouf, L., Skouri, K., and Konstantaras, I. (2016). "Optimal Control of Production, Remanufacturing and Refurbishing Activities in a Finite Planning Horizon Inventory System". *Journal of Optimization Theory and Applications*, 168(2): 677-698.
- Bhattacharya, R., Kaur, A., and Amit, R.K. (2018). "Price optimization of multi-stage remanufacturing in a closed loop supply chain". *Journal of Cleaner Production*, 186: 943-962.
- De Santi, C., Dal Lago, M., Buffolo, M., Monti, D., Meneghini, M., Meneghesso, G., and Zanoni, E. (2015). "Failure causes and mechanisms of retrofit LED lamps". *Microelectronics Reliability*, 55(9-10): 1765-1769.
- El Saadany, A.M., and Jaber, M.Y. (2010). "A production/remanufacturing inventory model with price and quality dependant return rate". *Computers and Industrial Engineering*, 58(3): 352-362.
- El Saadany, A.M., and Jaber, M.Y. (2011). "A production/remanufacture model with returns' subassemblies managed differently". *International Journal of Production Economics*, 133(1): 119-126.
- El Saadany, A.M., Jaber, M.Y., and Bonney, M. (2013). "How many times to remanufacture?". *International Journal of Production Economics*, 143(2): 598-604.
- Hesari, Z., and Hanifi, M.F. (2004). "Importance and necessity of developing the use of CFLs", *19th International Power System Conference*, Tavanir Org., Tehran, Iran.
- Hosseini, S.H., Roushan Milani, A., and Saba Vand Monfared, H. (2000). "Theoretical and experimental modeling of CFL usage in a distribution network". *Journal of Faculty of Engineering (University of Tabriz)*, 24: 13-25.
- Giri, B.C., and Sharma, S. (2016). "Optimal production policy for a closed-loop hybrid system with uncertain demand and return under supply disruption". *Journal of Cleaner Production*, 112(3): 2015-2028.
- Guo, J., He, L., and Gen, M. (2019). "Optimal strategies for the closed-loop supply chain with the consideration of supply disruption and subsidy policy". *Computers and Industrial Engineering*, 128: 886-893.
- Govindan, K., and Soleimani, H. (2017). "A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A Journal of Cleaner Production focus". *Journal of Cleaner Production*, 142(1): 371-384.
- Hasanov, P., Jaber, M.Y., and Zolfaghari, S. (2012). "Production, remanufacturing and waste disposal models for the cases of pure and partial backordering". *Applied Mathematical Modelling*, 36(11): 5249-5261.
- Jaber, M.Y., and El Saadany, A.M. (2009). "The production, remanufacture and waste disposal model with lost sales". *International Journal of Production Economics*, 120(1): 115-124.
- Jaber, M.Y., and El Saadany, A.M. (2011). "An economic production and remanufacturing model with learning effects". *International Journal of Production Economics*, 131(1): 115-127.
- Jeihoonian, M., Kazemi Zanjani, M., and Gendreau, M. (2017). "Closed-loop supply chain network design under uncertain quality status: Case of durable products". *International Journal of Production Economics*, 183: 470-486.
- Maiti, T., and Giri, B.C. (2015). "A closed loop supply chain under retail price and product quality dependent demand". *Journal of Manufacturing Systems*, 37(3): 624-637.
- Masoudipour, E., Amirian, H., and Sahraeian, R. (2017). "A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned products", *Journal of Cleaner Production*, 151: 344-355.
- Mawandiya, B.K., Jha, J., and Thakkar, J. (2017). "Production-inventory model for two-echelon closed-loop supply chain with finite manufacturing and remanufacturing rates". *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 4(3): 199-218.

- Mirmohammadi, S.H., and Sahraeian, R. (2018). "A Novel Sustainable Closed-loop Supply Chain Network Design by Considering". *International Journal of Engineering; Transactions B: Applications*, 31(11): 1918-1928.
- Moghaddam, K.S. (2015a). "Fuzzy Multi-Objective Model for Supplier Selection and Order Allocation in Reverse Logistics Systems under Supply and Demand Uncertainty". *Expert Systems with Applications*, 42(15-16): 6237-6254.
- Moghaddam, K.S. (2015b). "Supplier selection and order allocation in closed-loop supply chain systems using hybrid Monte Carlo simulation and goal programming". *International Journal of Production Research*, 53(20): 6320-6338.
- Niknejad, A., and Petrovic, D. (2014). "Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes". *European Journal of Operational Research*, 238(1): 143-154.
- Richter, J.L., Tähkämö, L., and Dalhammar, C. (2019). "Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts". *Journal of Cleaner Production*, 226: 195-209.
- Shahparvari, S., Chhetri, P., Chan C., and Asefi, H. (2018). "Modular recycling supply chain under uncertainty: a robust optimisation approach". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1-4): 915-934.
- Shekarian, E., Udoncy-Olugu, E., Abdul-Rashid S.H., and Bottani, E. (2016). "A Fuzzy Reverse Logistics Inventory System Integrating Economic Order/Production Quantity Models". *International Journal of Fuzzy Systems*, 18(6): 1141-1161
- Taleizadeh A.A., Haghghi, F., and Akhavan Niaki, S.T. (2019). "Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products". *Journal of Cleaner Production*, 207, 163-181.

¹. De Santi
². Richter
³. Govindan
⁴. Jaber and El-Saadany
⁵. BOM: Bill of Material
⁶. Hasanov
⁷. Petrovic
⁸. Mawandiya, Jha and Thakkar
⁹. Maiti and Giri
¹⁰. Giri and Sharma
¹¹. Benkherouf, Skouri and Konstantaras
¹². Bhattacharya, Kaur and Amit
¹³. Gendreau
¹⁴. Chhetri and Chan
¹⁵. Guo, He and Gen
¹⁶. Mixed Integer Programming (MIP)
¹⁷. CPU (Central Processing Unit)
¹⁸. RAM (Random Access Memory)

پیوست الف: اطلاعات پارامترهای مسئله

جدول ۱- الف: اندیس و مجموعه‌ها

تعداد اعضا	اندیس و مجموعه‌ها
۲	I
۳	J
۳	i'
۱۰	t
۴	k

جدول ۲- الف: هزینه‌های تولید و تقاضا هر واحد کالا در هر دوره

T	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
C_i	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
D_i	۷۸۲۷	۸۹۳۴	۶۱۵۴	۹۰۹۷	۶۱۸۲	۶۹۴۹	۶۷۵۰	۷۴۵۲	۶۳۴۵	۶۹۸۴

جدول ۳- الف: پارامترهای مرتبط با عناصر زنجیره روبه جلو

i	۱	۲
h_i	۲۵	۳۰
BC_i	۶۰	۶۵
A_i	۱۵۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰
موجودی اولیه	۶۰۰۰	۱۰۰۰

جدول ۴- الف: ظرفیت‌های و ضرایب بازگشتی

NP	۱۴۰۰۰	a_1	۰/۰۵
$MaxDisa$	۱۰۰۰	a_2	۰/۱
$MaxRP$	۱۰۰۰	a_3	۰/۲
$Max Refurbish_k$	۱۰۰۰		

جدول ۵- الف: قیمت قطعات مختلف ارائه شده توسط تأمین کنندگان

p_{kj}		K			
		۱	۲	۳	۴
J	۱	۱۵۰	۱۱۰	۶۰۰	۳۸۰
	۲	۱۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۳۵۰
	۳	۸۰	۹۰	۴۰۰	۳۰۰

جدول ۶- الف: پارامترهای وابسته قطعات

k	۱	۲	۳	۴
\hat{h}_k	۳/۴	۲/۵	۱۳/۳	۸/۴
$Aref_k$	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
a_k	۱	۱	۱	۱
$refcost_k$	۱۰	۱۰	۶۰	۲۰
Sc_k	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۱
$reuse_k$	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۸	۰/۷

جدول ۷- الف: هزینه راه‌اندازی بخش‌های مختلف زنجیره بازگشتی

i'	۱	۲	۳
$Ar_{i'}$	۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۷۰۰۰۰

جدول ۸- الف: کیفیت ارائه شده توسط تأمین‌کنندگان

j	۱	۲	۳
squ_j	3(A)	2(B)	1(C)

جدول ۹- الف: پارامترهای دیگر

π	Rc	$disp$	Dc
۹۶۰۰	۴۰۰	۰	۳۰۰
α	β	T	LTM
۰/۲	۰/۶	۲	۱