Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 15, Issue 2, No. 37, Summer 2024
https://doi.org/10.22108/pom.2024.138250.1515

(Research paper)

Spare Parts Inventory Optimization for Military Vehicles Using a Mixed Probability Distribution

Mojtaba Salehi *
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran, mojtaba.salehi@pnu.ac.ir
Mojtaba Omidvar
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Asalouye Center, Asalouye, Iran, mojtabaomidvar21@gmail.com
Shohreh Shariati
Department of Industrial Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Yazd University, Iran, s_shariati23@yahoo.com

Purpose: In general, inventory optimization is one of the most important techniques in the production system, because the high cost of an empty warehouse and the cost of losing customers can cause serious damage to a system. The basic idea for inventory is to provide flexibility for a system and protect the system against events such as stock out. Inventory capacity for each product or part is defined by demand, delivery time and part price. By balancing the supply and demand rates, the optimal inventory capacity can be achieved. It is necessary to use practical and effective techniques and solutions to reduce breakdowns to optimally use existing equipment and resources and reduce large costs in terms of energy wastage and repairs and repurchase of equipment. In this context, spare parts are one of the most important links in performing optimal maintenance and repairs and quickly returning equipment to the production line. In good management of spare parts, the inventory system of the warehouse will lead to the reduction of maintenance and repair costs, manpower and the duration of equipment failure and will ultimately help to increase productivity. This study aims to optimize the inventory level of spare parts for military vehicles using a mixed probability distribution.

Design/methodology/approach: First, based on the literature review and selected basic articles, the research gaps have been identified, and accordingly, a mathematical model has been developed and

* Corresponding author, Orcid: 0000-0002-9026-5293 2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

solved to optimize the spare parts of military vehicles. Then, a meta-inventive method has been used to solve the problem. This is because the use of meta-heuristic methods to check and analyze the sensitivity of inventory optimization models can lead to better and more accurate results, and also the use of these methods is relatively new and helps in solving optimization problems. Also, the problem studied in this research is a non-linear integer programming model, which has been used for the problems of medium and large dimensions due to the complexity of the problem. The meta-heuristic method based on the genetic algorithm has been applied to save the total costs. Finally, to prove the effectiveness of the model, the proposed model has been implemented in a case study on the parts of military vehicles in the 177th Brigade of Torbet Heydarieh.

Findings: Findings indicated that the optimal system cost value and the economic order value were obtained during specific iterations of the model, i.e., the first, fourth, and tenth iterations. These points implied the effectiveness of integrating Poisson and Exponential distributions in the model and optimizing the system performance in different scenarios. Such results emphasize the consistency and robustness of the proposed inventory management strategy, especially when demand fluctuates and supply challenges. As the model is subjected to more iterations, differences in results are observed, indicating the potential for variability with increasing iterations. For example, if the model considers 100 different problems or scenarios, different results may appear, although a general consistency in system behaviour is noted. This indicates flexibility in the modelling approach, where even significant changes in parameters such as inventory costs or lead times are unlikely to drastically change the economic value or efficiency of the system.

Research limitations: This research was conducted on a case-by-case basis on the parts of military vehicles of the 177th brigade of Torbat Heydarieh city, so it should be possible to generalize it to other organizations, and because it was typically a cross-sectional study, conclusions about on the causality might seem difficult.

Practical implications: The main challenge in the supply chain is to control inventory levels by determining the size of orders for each department during each period to optimize the objective function, which has been investigated in various studies because inventory optimization is one of the important and practical techniques for optimizing the economic value of the order and realizing a stable situation in a production system. This is particularly important since the high cost of an empty warehouse and the cost of losing customers can cause serious damage to a system

Social implications - Due to the specific conditions of embargo and restrictions on access to international markets, accurate inventory management can serve as a key tool to maintain efficiency and sustainability in military operations. This research recommends that relevant organizations continuously analyze and optimize their inventory levels using mathematical models and optimization algorithms such as genetic algorithms to avoid additional costs and at the same time, to ensure the supply of parts in times of need.

Originality/value: Predicting exactly what and how many spare parts are needed for the necessary equipment in a business and when they are needed to be available in its warehouse is an important issue to consider. These parts are identified and managed to support the functions of critical equipment, and the lack of critical spare parts during planned or unplanned repairs will significantly influence the overall effectiveness of the equipment.

Keywords: Optimization, Inventory level, Military vehicles, Combined probabilistic distribution

پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۵، شماره ۲، پیاپی ۳۷، تابستان ۱۴۰۳
دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹ ص ۱-۲۵
https://doi.org/10.22108/pom.2024.138250.1515

(مقالهٔ پژوهشی)

بهینه‌سازی سطح موجودی قطعات یدکی خودروهای نظامی با استفاده از توزیع احتمال ترکیبی

مجتبی صالحی*[۱]، مجتبی امیدوار[۲]، شهره شریعتی[۳]

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، mojtaba.salehi@pnu.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور مرکز عسلویه، عسلویه، ایران، mojtabaomidvar21@gmail.com
۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، ایران، s_shariati23@yahoo.com

چکیده: هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی سطح موجودی قطعات یدکی خودروهای نظامی با استفاده از توزیع احتمال مختلط است. این روش شامل طراحی یک مدل براساس توزیع احتمال مختلط و استفاده از یک الگوریتم ژنتیک برای حل آن است. ارزیابی هزینهٔ سیستم بهینه و کمیت سفارش اقتصادی، نشان داد که مقرون به‌صرفه‌ترین مقادیر در تکرارهای اول، چهارم و دهم به دست آمد. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که مدل هزینهٔ بهینه به تمام پارامترهای بررسی‌شده به زمان لجستیک، بیشترین تأثیر و هزینهٔ هر واحد موجودی کمترین حساس بود. یافته‌ها نشان می‌دهد مقدار سفارش بهینه براساس حداقل هزینه است و درنهایت بهترین مقدار سفارش در ابتدای راه‌حل مدل، تعیین می‌کند که ازنظر هزینه بهینه بود. با تغییر پارامترها، مقدار سفارش بهینه، شناسایی شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، سطح موجودی، وسایل نقلیهٔ نظامی، توزیع احتمالات مختلط

* نویسنده مسئول، Orcid: 0000-0002-9026-5293

2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

چالش اصلی در زنجیرهٔ تأمین، کنترل سطوح موجودی با تعیین اندازهٔ سفارش‌ها برای هر بخش در طول هر دوره برای بهینه‌سازی تابع هدف است که در تحقیقات مختلف، بررسی شد؛ زیرا بهینه‌سازی موجودی یکی از تکنیک‌های مهم و کاربردی برای بهینه‌سازی مقدار اقتصادی سفارش و تحقق یک وضعیت پایدار در یک سیستم تولیدی به شمار می‌آید، چون هزینهٔ بالای خالی‌بودن انبار و همچنین هزینهٔ از دست رفتن مشتری، آسیب‌های جدی را به یک سیستم وارد می‌کند (اسلپچنکو و وان در هایدنم[۱]، ۲۰۱۶). بنابراین تعیین مدل کاربردی بهینه برای کنترل موجودی و زنجیرهٔ تأمین، همواره یکی از چالش‌های مدیریت موجودی و تولید و تأمین بوده و در این عرصه، تلاش‌های زیادی انجام و مدل‌های مختلفی ارائه شده است (شهابی و همکاران[۲]، ۲۰۱۳).

به‌طور کل بهینه‌سازی موجودی، یکی از تکنیک‌های مهم در سیستم تولیدی است؛ زیرا هزینهٔ بالای خالی‌بودن انبار و همچنین هزینهٔ از دست رفتن مشتری، آسیب‌های جدی را به یک سیستم وارد می‌کند. ایدهٔ اولیه برای موجودی، ارائهٔ انعطاف‌پذیری برای یک سیستم و حفاظت از سیستم در برابر وقایعی نظیر خالی‌شدن انبار است. ظرفیت موجودی برای هر محصول یا قطعه به‌وسیلهٔ تقاضا، زمان تحویل و قیمت قطعه تعریف می‌شود. با ایجاد توازن بین نرخ عرضه و تقاضا، ظرفیت بهینهٔ موجودی در دسترس است. استفاده از تکنیک‌ها و راهکارهای عملی و مؤثر در کاهش خرابی‌ها در جهت استفادهٔ بهینه از تجهیزات و منابع موجود و کاهش هزینه‌های کلان در راستای هدررفتن انرژی و تعمیرات و خرید مجدد تجهیزات، بسیار ضروری است (برتازی و همکاران[۳]، ۲۰۱۵).

در این زمینه، قطعات یدکی یکی از مهم‌ترین حلقه‌ها در انجام بهینهٔ نگهداری و تعمیرات و بازگردانیدن سریع تجهیزات به خط تولید است. در یک مدیریت خوب قطعات یدکی، سیستم موجودی انبار به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، نیروی انسانی و مدت‌زمان از کار افتادگی تجهیزات منجر می‌شود و درنهایت به افزایش بهره‌وری کمک می‌کند (چو و همکاران[۴]، ۲۰۱۷).

بنابراین پیش‌بینی اینکه دقیقاً چه قطعات یدکی و به چه میزانی برای تجهیزات لازم در یک کسب و کار مورد نیاز و در چه زمانی لازم است در انبار آن موجود باشد، یک مسئلهٔ مهم برای بررسی است. این قطعات برای پشتیبانی از کارکردهای تجهیزات مهم و حیاتی، مشخص و مدیریت می‌شوند و فقدان قطعات یدکی حیاتی و مهم در زمان تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده یا برنامه‌ریزی‌نشده، ضربهٔ بزرگی به شاخص اثربخشی کلی تجهیزات خواهد زد (چکوبی و همکاران[۵]، ۲۰۲۲).

بنابراین مدیریت مؤثر هزینهٔ قطعات یدکی برای شرکت‌های تولیدی و خدماتی بسیار ضروری است، اما یکی از دشوارترین چالش‌ها در مدیریت مؤثر و کارآمد این قطعات، مدیریت و کنترل سطح موجودی آنها برای دستیابی به بهترین سطح خدمات، به‌خصوص در صنعت نظامی است (اسلپچنکو و وان در هایدنم، ۲۰۱۶).

با توجه به اینکه تاکنون مطالعه‌ای بر سیستم مدیریت موجودی انبارداری و نگهداری و همچنین خرید تجهیزات نظامی، به‌خصوص لوازم‌یدکی خودروهای نظامی انجام نشده و از سوی دیگر با توجه به وضعیت کشور و قرارگرفتن در تحریم‌های جدید، باعث کاهش دسترسی به بازارهای جهانی شده است، مطالعهٔ حاضر، مدل ریاضیِ بهینه‌سازی سطح موجودی را برای قطعات یدکی خودروهای نظامی، با استفاده از توزیع احتمال ترکیبی ارائه و

بررسی کرده است. بر این اساس، مسئله و پرسش اصلی مقاله عبارت است از: چگونه مدلی برای بهینه‌سازی سطح موجودی هدف برای قطعات یدکی خودروهای نظامی، با توزیع تقاضای نامشخص ارائه کرد؟ نتایج تحقیق حاضر به پرکردن شکاف نظری موجود در پیشینهٔ تحقیق دربارهٔ بهینه‌سازی سطح موجودی برای قطعات یدکی خودروهای نظامی، با استفاده از توزیع احتمال ترکیبی کمک می‌کند.

در بخش بعدی مقاله، پژوهش و پیشینهٔ تحقیق بررسی و سپس روش‌شناسی، نتایج تحلیل داده‌ها و بحث و نتیجه‌گیری تحقیق، ارائه می‌شود.

۲- مبانی نظری و پیشینهٔ تحقیق

قطعات یدکی، یکی از مهم‌ترین حلقه‌ها در انجام بهینهٔ نگهداری و تعمیرات و بازگردانیدن سریع تجهیزات به خط تولید است. در یک مدیریت خوب قطعات یدکی، سیستم موجودی انبار به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، نیروی انسانی و مدت‌زمان از کار افتادگی تجهیزات منجر می‌شود و درنهایت به افزایش بهره‌وری کمک می‌کند. بنابراین دانستن (پیش‌بینی) آنکه دقیقاً چه قطعات یدکی و به چه میزانی برای تجهیزات مورد نیاز و در چه زمانی لازم است در انبار شرکت موجود باشد، یک امر تخصصی و ضروری است. امروزه مدیریت مؤثر هزینهٔ قطعات یدکی برای شرکت‌های تولیدی و خدماتی، بسیار ضروری است. با توجه به اهمیت کارکرد درست خودروهای نظامی، چه در زمان صلح و چه در میدان‌های جنگی، پژوهشی در این راستا انتخاب شد، در این بخش پس از بیان مطالبی اولیه در راستای این پژوهش، مطالعات انجام‌شده در این حیطه بررسی و مشخص شد تاکنون تحقیقی با هدفِ این پژوهش انجام نشده و شکاف تحقیقاتی در این زمینه مشهود است (ژانگ و همکاران[۶]، ۲۰۲۱).

۲-۱ مفهوم موجودی

مفهوم موجودی طبق تعاریف نظری و به‌طور کلی عبارت است از انباشت ذخیرهٔ منابع در یک سیستم (لیو و همکاران[۷]، ۲۰۱۹). ایدهٔ اولیه برای تبیین موجودی، ارائهٔ انعطاف‌پذیری برای یک سیستم و حفاظت از سیستم در برابر وقایعی نظیر خالی‌شدن انبار است. از سوی دیگر ظرفیت موجودی برای هر محصول یا قطعه به‌وسیلهٔ تقاضا، زمان تحویل و قیمت قطعه تعریف می‌شود (طالعی‌زاده و زمانی دهکردی[۸]، ۲۰۱۷).

نتایج تحقیقات نشان داده است با ایجاد توازن بین نرخ عرضه و تقاضا، ظرفیت بهینهٔ موجودی در دسترس است و اگر نرخ عرضه بیش از نرخ تقاضا باشد، موجودی ازنظر ظرفیت افزایش می‌یابد. همچنین اگر نرخ تقاضا بیش از عرضه باشد، ظرفیت موجودی کاهش می‌یابد. انواع مختلفی برای سیستم موجودی در نظر گرفته شده است، ازجمله موجودی ایمن، موجودی چرخشی، موجودی انفصالی و موجودی مورد انتظار (یوهانسمن و همکاران[۹]، ۲۰۲۲).

موجودی ایمن که موجودی بافر نیز تعیین می‌شود، برای واکنش به وقایع غیرمنتظرهٔ عرضه و تقاضا طراحی می‌شود. این موجودی بیشتر در سیستم‌هایی به کار می‌رود که تقاضای واردشده را به شکل دقیق پیش‌بینی نمی‌کنند؛ این امر باعث می‌شود که قطعات یا محصولات با ظرفیت معین در دسترس باشند و در زمانی استفاده شوند که رویدادی غیرمنتظره در تقاضا یا عرضه رخ می‌دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

موجودی چرخشی زمانی اعمال می‌شود که ظرفیت تولید و موجودی با تقاضا منطبق نشود؛ یعنی تغییرات مختلف در محصولات یک‌بار در چرخه‌ها انجام شود و زمانی که یک محصول در انبار تخلیه می‌شود، تولید آن آغاز می‌شود. موجودی انفصالی نیز در چیدمان‌های فرایندی رخ می‌دهد که در آن هر بخش تولید یک صف را تشکیل می‌دهد. در این نوع از موجودی، هر بخش نرخ تولید خاص خود را دارد و محصولات برای موجودی انفصالی بخش خود، تولید می‌کند و محصولات در موجودی، باید منتظر مرحلهٔ بعدی فرایند تولید بمانند. همچنین موجودی مورد انتظار، به فرض برای کالاهای فصلی استفاده می‌شود و در این رویکرد، هر زمان تغییر زیادی در تقاضا وجود داشته باشد، محصولات با سرعت ثابتی تولید می‌شوند (چکوبی و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۲ مفهوم هزینهٔ موجودی

پیشینهٔ هزینهٔ موجودی نشان می‌دهد هزینهٔ نگهداری موجودی از هزینه‌های اصلی سیستم کنترل موجودی و شامل موارد زیر است:

• سرمایهٔ کاری (سرمایهٔ در گردش): سرمایهٔ در گردش یا سرمایهٔ کاری، معمولاً مهم‌ترین نوع هزینهٔ موجودی و به این صورت است که در زمان سفارش محصول برای ذخیره‌سازی تولید، باید درآمد آن را پیش از ارسال کالا دریافت کرد، اما اقلام ذخیره پیش از آنکه به مشتری فروخته شوند، حجم معینی از زمان را صرف موجودی می‌کنند و در طی زمان بین پرداخت مبلغ به تولیدکننده و دریافت پول از مشتری، شرکت باید خود این اقلام را تأمین مالی کند. این امر سرمایهٔ در گردش نامیده می‌شود و هزینهٔ آن به‌صورت بهرهٔ یک بانک، که برای پول قرض گرفته شده است، پرداخت و در نظر گرفته شود (اسلپچنکو و وان در هایدنم، ۲۰۱۶)؛

• کهنگی: در زمانی که محصولات یا قطعات، حجم معینی از زمان را در انبار سپری کرده باشند، این احتمال وجود دارد که محصولات جای خود را به یک محصول جدید بدهند و مدل‌های قدیمی منسوخ شوند. وقتی چنین رخدادی پیش می‌آید، ارزش کالای ذخیره‌شده افت می‌کند یا در بدترین حالت، بی‌ارزش می‌شود. این هزینه، هزینهٔ کهنگی یا منسوخ‌شدن نامیده می‌شود (رضایی و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۸)؛

• هزینهٔ سفارش: هر زمان که محصولی، یک کالای ذخیره‌شده در انبار تلقی شود، از لحظهٔ ارسال سفارش به تولیدکننده تا لحظهٔ دریافت کالا، هزینه‌هایی وجود دارد؛ مانند تمامی اسناد خرید، آماده‌سازی و چیدمان‌های لجستیکی که هزینهٔ سفارش‌دهی قلمداد می‌شوند (چو و همکاران، ۲۰۱۷)؛

• هزینهٔ عملیاتی: در کنار هزینه‌های فوق، انبار فیزیکی برای فعال‌ماندن، نیازمند پول است. درواقع یک انبار نیازمند ویژگی انبار است، یعنی به نیروی انسانی، گرمایش، نور و ابزار احتیاج دارد. به‌علاوه موجودی باید تضمین و بیمه‌شده و هزینهٔ بیمه به‌وسیلهٔ ارزش کل موجودی و شرایط محیطی تعیین شود. این امر به‌صورت هزینهٔ انبار قلمداد می‌شود (برتازی و همکاران، ۲۰۱۵)؛

• هزینهٔ خالی‌شدن انبار: هزینهٔ خالی‌شدن انبار از محصول، هزینه‌ای است که ناشی از یک موجودی با برنامه‌ریزی مناسب است. وقتی که موجودی خالی باشد، تقاضا وجود دارد. دو نوع هزینهٔ خالی‌ماندن موجودی وجود دارد: هزینهٔ داخلی و هزینهٔ خارجی. در تخلیهٔ انبار به شکل داخلی که برای موجودی در حال انفصال رخ می‌دهد، هزینه‌های ناشی از ناکارایی تولید است و وقتی که فرایندهای قبلی به‌سرعت فرایندهای بعدی پردازش کند،

تخلیهٔ انبار به شکل داخلی رخ می‌دهد (جوان و همکاران[۱۱]، ۲۰۱۴). از سوی دیگر تخلیهٔ انبار بیرونی زمانی رخ می‌دهد که شرکت عرضه به مشتریان را انجام ندهد و مشتریان شرکت دیگری را انتخاب کنند. اما در زمان سفارش کالا از تولیدکننده، معمولاً مقدار بیش از سفارش‌های عادی است و زمان‌بندی خیلی سخت‌گیرانه نیست. تولیدکنندگان معمولاً تخفیف را در این موارد ارائه می‌کنند و محصولات با قیمتی کمتر از حالت عادی خریداری می‌شوند (لین و همکاران[۱۲]، ۲۰۲۱).

این هزینه‌ها باید حتماً در طی مرحلهٔ برنامه‌ریزی موجودی، مدنظر قرار بگیرند.

۲-۳ مدیریت موجودی قطعات یدکی

مدیریت موجودی مناسب در هر صنعت، اهمیت بسیاری دارد، اما بخش قطعات یدکی دو ویژگی متمایز دارد که ممکن است مدیریت آن را چالش‌برانگیزتر کند:

۱- الگوهای تقاضای متناوب با مشخصهٔ توالی مشاهده‌های تقاضای صفر که ترکیبی از تقاضاهای غیر صفر متغیر و گاه و بیگاه‌اند؛

۲- تعداد و تنوع قطعات یدکی مورد نیاز برای حمایت از یک محصول (طالعی‌زاده و زمانی دهکردی، ۲۰۱۷).

تحقیقات مهمی دربارهٔ مدیریت موجودی قطعات یدکی انجام و تاکنون چندین مدل موجودی در موجودی نگهداری، سیاست‌های نگهداری و پیش‌بینی تقاضای قطعات یدکی ارائه شده‌اند، اما دربارهٔ روش‌های مدیریت موجودی مناسب قطعات یدکی، به تحقیقات زیر اشاره می‌شود: مون و کیم[۱۳] (۲۰۱۷)، هم‌زمان یک مدل بهینه‌سازی قطعات یدکی را توسعه دادند که ارائه‌گر یک سازگاری بین هزینهٔ خرید و کمبود، براساس توابع نرخ شکست‌نمایی[۱۴] و ویبول[۱۵] با این فرض است که شکست مطابق با فرایند پواسون همگون[۱۶] رخ می‌دهد. در این تحقیق، آزمایش‌های محاسباتی با استفاده از داده‌های به دست آمده از نیروی دریایی کره، نشان داد که در کل دورهٔ تدارک، مدل بهینه‌سازی با استفاده از نرخ شکست‌نمایی[۱۷]، سطح قطعات یدکی هم‌زمان را بیش از حد برآورد کرده است؛ بنابراین به هزینهٔ خرید بیشتری نسبت‌به نرخ شکست ویبول[۱۸] منجر شد (مون و کیم، ۲۰۱۷).

تیواری و همکاران[۱۹] (۲۰۱۸) مدیریت موجودی پایدار را با اقلام فاسدشدنی و کیفیت ناقص بررسی کرده‌اند.

یوهانسمن و همکاران (۲۰۱۹) راهکارهای مدیریت موجودی قطعات یدکی بهینه‌شده را برای خودروهای نظامی بررسی و مدلی مفهومی را براساس روش‌های کیفی، برای آن ارائه کرده‌اند؛ به این صورت که آنها مطالعهٔ موردی را دربارهٔ تأمین غذا، دارو، قطعات یدکی در یک کمپ انجام دادند. این پژوهش به بهینه‌سازی موجودی قطعات یدکی در جهت ذخیره‌سازی برای یک موقعیت استقرار منجر شد (اسلپچنکو و وان در هایدنم، ۲۰۱۶).

لیو و همکاران (۲۰۱۹) مسئلهٔ مسیریابی موجودی را ازنظر توزیع احتمال برای به حداکثر رساندن سطح خدمات تحت بودجهٔ محدود بررسی کرده‌اند.

همچنین احمد و همکاران[۲۰] (۲۰۲۲) مدلی را برای مدیریت موجودی و برای زنجیرهٔ تأمین جهانی ازطریق کار مجدد لوازم‌یدکی معیوب و دارای سطح موجودی مثبت در دورهٔ اعتباری ارائه کردند.

بررسی پیشینهٔ تحقیق نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی برای ارائهٔ مدل به‌جهت بهینه‌سازی سطح موجودی برای قطعات یدکی خودروهای نظامی، با استفاده از توزیع احتمال ترکیبی ارائه نشده و شکاف تحقیقاتی در این زمینه مشهود است.

۲-۴ روش‌های بهینه‌سازی موجودی قطعات یدکی

۲-۴-۱ روش تعیین تقاضا در سطح ۵۰درصد تقاضا در طی دورهٔ اکتساب

تعیین ذخیرهٔ تضمینی ۵۰ درصد مصرف میانگین برای دورهٔ میانگین عدم قطعیت ساده است. این روش نسبتاً دقیق نیست و تغییرات تقاضا و عرضه را در نظر ندارد. همان‌طور که گراهام[۲۱] (۱۹۶۷) اشاره می‌کند، شاید ضروریات قابلیت اطمینان ایمنی برای قطعات بحرانی، با افزایش نسبت ذخیرهٔ ایمنی تا ۲۰درصد تغییر یابد.

$$x_p = 0.5\bar{p}\bar{t}_p \quad (۱)$$

در اینجا xp ذخیرهٔ ایمنی، P میانگین مصرف در هر واحد زمانی و Tp میانگین زمان بیکاری قطعات یدکی است.

۲-۴-۲ روش مبتنی بر ضریب ترکیب

ماهیت این روش تعیین ذخیرهٔ ایمنی براساس عامل ترکیب است. ضریب ایمنی معمولاً براساس دامنهٔ امتیازات خاص معیارها برای تعیین ذخیرهٔ ایمنی استفاده می‌شود. این نتیجه از رابطهٔ ذیل محاسبه می‌شود.

$$Z_p = M_{pl} \times k_j \quad (۲)$$

در اینجا Mpl میانگین مصرف سالیانه

Kj ضریب تضمین و Zp میزان عرضه است.

مزیت این روش در سادگی آن است و به دانش یا نرم‌افزار آماری یا ریاضی خاصی نیاز ندارد. عیب آن در این است که طیف کاملی از عوامل اثرگذار بر مدیریت موجودی را به‌وسیلهٔ یک مقیاس امتیازدهی جهانی در نظر نمی‌گیرد و لازم است متغیرهای متفاوتی از مقیاس امتیازدهی یا ضرایب حفاظت برای موارد خاص وجود داشته باشد. با در نظر گرفتن اینکه این روش متکی بر ارزیابی ذهنی از معیار است و ضریب حفاظت به‌دقت شامل انحرافات کوتاه‌مدت در زنجیرهٔ تأمین نمی‌شود، برای اقلام با اهمیت کمتر توصیه می‌شود.

۲-۴-۳ روش تعیین ذخیرهٔ ایمنی به‌وسیلهٔ انحراف استاندارد از میزان نیاز و طول دورهٔ اکتساب و میانگین نیاز

روش فوق یک روش تقریبی ساده است؛ زیرا انحرافات استاندارد از تقاضا در کل اضافه می‌شود، به‌علاوه نوسانات موجود در عرضه به حساب نمی‌آید (احمد و همکاران، ۲۰۲۲). به این دلیل، این روش برای اقلام نوع b و نوع c مناسب است.

$$x_p = K\left(\sigma_p + \bar{p}\sigma_{tm}\right) \quad (۳)$$

در اینجا xp ذخیرهٔ ایمنی،

P میانگین مصرف در هر واحد زمانی، K عامل ایمنی، انحراف استاندارد از مصرف و تقاضا

σ_{tn} انحراف استاندارد از بازهٔ عدم قطعیت است.

۴-۴-۴ روش تعیین ذخیرهٔ ایمنی به‌وسیلهٔ انحراف استاندارد از اندازهٔ نیاز و طول دورهٔ خرید و میانگین اندازهٔ نیاز و دورهٔ تحویل

این روش، موانع روش قبلی و تأثیر ترکیبی نوسانات در تقاضا و طول بازهٔ عدم قطعیت بررسی می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). در عین حال بخشی از ذخیرهٔ ایمنی برای پوشش نوسانات در عرضه، نشانگر ذخیرهٔ ایمنی برای پوشش نوسانات در تقاضاست. این یک روش پیچیده است که مناسب تلاش محاسباتی بالا برای اعمال آیتم‌های موجودی بحرانی و آیتم‌های نوع A است.

$$x_p = K\sqrt{\bar{t_n}\sigma_p^2 + \bar{p}^2\sigma_{tn}^2} \quad (۴)$$

۵-۴-۲ روش تعیین ذخیرهٔ ایمنی به‌وسیلهٔ انحراف استاندارد از اندازهٔ نیاز در طی دورهٔ خرید؛ محاسبهٔ ساده برای تقاضای تصادفی

روش فوق مناسب اقلام با تقاضای غیر ساکن است که شاید یک حالت معمول برای قطعات یدکی به شمار آید، از هم‌ترازی تصاعدی برای سری زمانی استفاده می‌کند و با مساوی قرار دادن مقدار ثابت γ مقادیری را در بازهٔ ۰,۱ بگیرد. هرچه مقدار ثابت بیشتر باشد، رفتار تقاضا بیشتر ماهیت غیر ایستا دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲)؛ برای مثال مقدار بهینهٔ ثابت به‌وسیلهٔ میانگین معیار خطای مجذور میانگین MSE تعیین می‌شود.

$$x_n = K\sigma_n\sqrt{t_n}\sqrt{1+\gamma(t_n-1)+\gamma^2\frac{t_n+(t_n+1)(2t_n+1)}{6}} \quad (۵)$$

۳- روش پژوهش

روش تحقیق حاضر به‌لحاظ هدف، کاربردی و به‌لحاظ روش، گردآوری اطلاعات تحقیق برای اجرای مدل میدانی است، جزء تحقیقات کتابخانه‌ای و به‌لحاظ روش تحلیل داده‌ها، جزء تحقیقات توصیفی و تحلیل است. همچنین به‌لحاظ ماهیت نیز جزء تحقیقات کمی است. برای انجام تحقیق، ابتدا با توجه به تحقیقات پیشین و مقالات پایهٔ انتخاب‌شده، شکاف‌های تحقیقاتی شناسایی و طبق آن یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی قطعات یدکی خودروهای نظامی حل و تدوین و سپس از روش فراابتکاری برای حل مسئله استفاده شد؛ به این علت که استفاده از روش‌های فراابتکاری برای بررسی و تحلیل حساسیت مدل‌های بهینه‌سازی موجودی، به نتایج بهتر و دقیق‌تری منجر می‌شود و همچنین استفاده از این روش‌ها، نسبتاً جدیدتر است و در حل مسائل بهینه‌سازی، روش تحقیق را تقویت می‌کند. همچنین مسئلهٔ ارائه‌شده در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی است که به‌علت پیچیدگی مسئله برای مسائل در ابعاد متوسط و بزرگ این روش استفاده شده است، روش فراابتکاری مبتنی بر

الگوریتم ژنتیک نیز، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های کل می‌شود. درنهایت به‌منظور اثبات کارآیی مدل، مدل ارائه‌شده به‌صورت موردی بر قطعات خودروهای نظامی موجود در تیپ ۱۷۷ تربت حیدریه اجرا شد.

مدل، تابع هدف و محدودیت‌های مدل تحقیق، به‌صورت زیر بود:

۳-۱ بهینه‌سازی تابع هزینه

هدف این بخش، یافتن سیاست بهینه یا به عبارت دیگر محاسبهٔ مقدار اقتصادی سفارش است که به کمینه‌شدن هزینهٔ کل سیستم منجر می‌شود. با داشتن سنجه‌های عملکرد سیستم و هزینه‌های مربوط به آنها، تابع هزینه طبق مدل مقالهٔ یوهانسمن و همکاران[۲۲] (۲۰۱۹) و با رابطهٔ ۶ محاسبه شد:

$$C(r,Q) = \bar{h}\bar{I} + \overline{Ls}s + K\bar{o} + \tau\bar{T} \quad (۶)$$

در این معادله، r مقدار موجودی، Q مقدار اقتصادی سفارش‌ها و $C(r,Q)$ نشانگر هزینهٔ کل سیستم است؛ همچنین h: هزینهٔ نگهداری هر واحد از موجودی، S: هزینهٔ هر واحد فروش از دست رفته، K: هزینهٔ هر بار سفارش‌دهی و T: هزینهٔ انتظار هر مشتری است. همچنین براساس (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲)، متغیرهای فوق به شکل معادلهٔ ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند:

$$\bar{I} = \frac{\frac{Q^2}{2} + aQ}{Q+b} \quad (۷)$$

$$\overline{Ls} = \frac{b\lambda}{Q+b} \quad (۸)$$

$$\bar{O} = \frac{\lambda}{Q+b} \quad (۹)$$

$$\bar{T} = \frac{W\lambda Q}{Q+b} \quad (۱۰)$$

λ (نرخ ورود تقاضا) و W نیز نشان‌دهندهٔ میانگین مجموع زمان انتظار تقاضاست. همچنین پارامترهای a و b که برای ساده‌سازی مدل تعریف می‌شوند، براساس (اسلپچنکو و وان در هایدنم، ۲۰۱۶)، به‌صورت رابطهٔ ۱۱ و ۱۲ هستند:

$$a = \frac{1}{2} + r + \frac{\lambda}{v} + \frac{\lambda}{v}\left(\frac{\lambda}{\lambda+v}\right)^r \quad (۱۱)$$

$$b = \frac{\lambda}{v}\left(\frac{\lambda}{\lambda+v}\right)^r \quad (۱۲)$$

شایان ذکر است که در مدل ارائه‌شده در تحقیق و معادله‌های ۶ تا ۱۲، تقاضا طبق فرایند پواسون[۲۳] با پارامتر λ (نرخ ورود تقاضا) وارد سیستم و زمان خدمت‌دهی هر کانال از توزیع نمایی با پارامتر U (زمان خدمت‌رسانی) مشخص شده است. توزیع زمان رسیدن سفارش‌ها در راه نیز، توزیع نمایی با پارامتر v (زمان رسیدن تدارکات) دارد. سیاست موجودی نیز (r,Q) است، یعنی اگر موجودی کمتر یا مساوی مقدار r باشد، سفارش‌دهی به‌اندازهٔ ثابت Q انجام می‌شود. باید توجه داشت که هر تقاضا دقیقاً به یک کالا از موجودی نیاز دارد؛ بنابراین با خارج‌شدن هر تقاضا از سیستم، یک واحد از موجودی کاسته می‌شود.

بنابراین برای جلوگیری از دوره‌های منحط طبق (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲)، فرض $Q>r$ و برای رسیدن به حالت پایا فرض $\lambda > 0$ را منظور می‌کنیم. همچنین در معادلات ۶ تا ۱۲، پارامتر τ و طول هر دوره است و مقدار موجودی

در این دوره، برابر با مقدار k است. با فرض زمان رسیدن تدارکات طبق توزیع‌نمایی با پارامتر v و پایابودن سیستم خواهیم داشت:

$$E(\tau) = \frac{1}{\lambda}(\frac{\lambda}{\lambda+v})^r \left[Q\left(\frac{\lambda+v}{\lambda}\right)^r + \frac{\lambda}{v}\right] \quad (۱۳)$$

رابطهٔ فوق براساس توزیع پواسون به دست می‌آید و λ و v ورودی در نظر گرفته می‌شوند. حال با جای‌گذاری روابط ۶ تا ۱۳ در تابع هدف ۱۴، خواهیم داشت:

$$C(r,Q) = \frac{\frac{h}{2}Q2 + haQ + sb\lambda + k\lambda + tW\lambda Q}{Q+b} \quad (۱۴)$$

اکنون برای یافتن مقدار اقتصادی سفارش با در نظر گرفتن r مشخص و مشتق‌گرفتن از تابع هزینه، باید مقادیری از Q را پیدا کنیم که مقدار تابع هزینه را کمینه می‌کند؛ یعنی:

$$\frac{dC}{dQ} = 0$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{\frac{h}{2}Q2 + haQ + hab - (k\lambda + sb\lambda + tW\lambda Q)}{(Q+b)^2} \quad (۱۵)$$

بنابراین تابع نهایی به شکل معادلهٔ ۱۶ خواهد شد:

$$Q^* = -b + \sqrt{b^2 + \frac{2}{h}(k\lambda + sb\lambda + tW\lambda Q - hab)} \quad (۱۶)$$

۲-۳. محدودیت اندازهٔ بهینهٔ هر بار سفارش

با در نظر گرفتن فرض $Q>r$، رابطهٔ به دست آمده برای Q^* زمانی درست است که رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$hb^2 + 2(k\lambda + sb\lambda - tW\lambda Q - hab) - h(r+b)^2 \geq 0 \quad (۱۷)$$

بنابراین به ازای $Q>0$ نشان می‌دهیم که اگر رابطهٔ ۱۷ برقرار باشد، تابع هزینهٔ محدب است:

$$hb^2 + 2(k\lambda + sb\lambda - tW\lambda Q - hab) > 0 \quad (۱۸)$$

بنابراین محدودیت روابط ۱۷ و ۱۸، اندازهٔ بهینهٔ هر بار سفارش قطعات یدکی را تعیین می‌کنند.

در بخش بعد، نتایج حل تابع با الگوریتم فراابتکاری ژنتیک ارائه می‌شود.

۴- نتایج تحلیل داده‌ها

شایان ذکر است که در فرایند حل مسئلهٔ تحقیق با الگوریتم ژنتیک، منظور از کروموزوم در الگوریتم، مقدار بهینهٔ سفارش یا Q است که با در نظر گرفتن پارامترهای مطرح‌شده در روابط ۶ تا ۱۷ حل و نتایج آن در تکرارهای مختلف در ادامه ارائه می‌شود.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک به کار رفته در تحقیق، در جدول ۱ ارائه شده است که نتایج حل مدل را در مرحلهٔ اول نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Table 1. Genetic algorithm parameters

تعداد تکرار	جمعیت اولیه	نرخ تقاطع	درصد جهش
۵۰۰	۱۵۰	۰/۷	۰/۳

در جدول ۲، حل مدل در ابعاد ده‌گانه ارائه شده است.

جدول ۲- حل مدل در ابعاد ده‌گانه

Table 2. Solving the model in 10 dimension

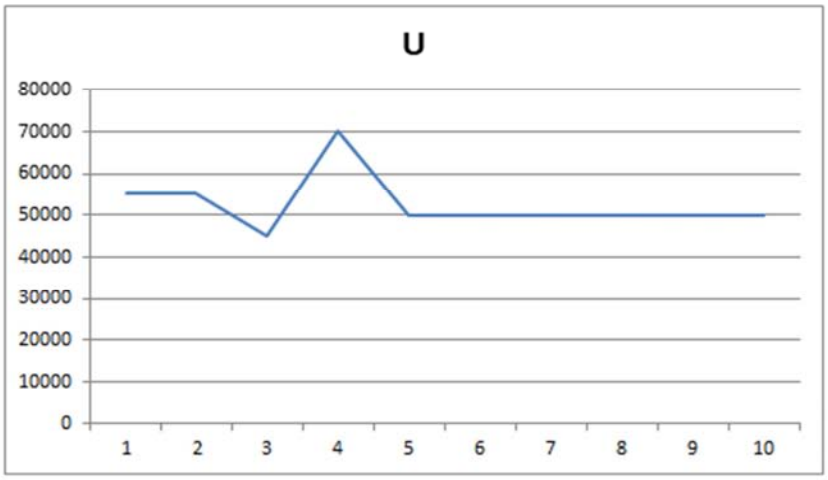
ردیف	λ	U	v	h	s	k	t	r	Q	هزینه سیستم
۱	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۶,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	۹۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۴۵۰۰	۳۷۰۰۰	۹۹,۹۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	۷۵۰۰۰	۴۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۱۵۰۰	۳۵۰۰۰	۷۸,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۴	۷۵۰۰۰	۷۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۷۶,۵۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۵	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۴۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۸۰۰۰	۴۴۰۰۰	۹۹,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۶	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۶۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۳۷۰۰۰	۸۳,۲۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۸۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۷۸,۴۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۸	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۸۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۷۸,۷۱۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۹	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۷۹,۷۱۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	۷۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۷۸,۳۶۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰

در نمودارهای آورده‌شده در شکل‌های ۱ تا ۹، نمودار تغییرات پارامترها در ابعاد ده‌گانه ارائه شده است:

شکل ۱- نمودار نرخ ورود تقاضا (لاندا)

Fig, 1-Demand arrival rate chart

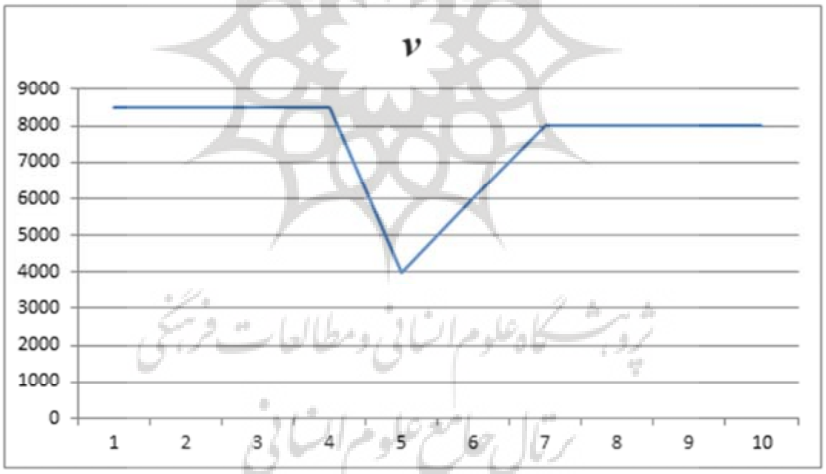
نمودار شکل ۱، نرخ ورود تقاضا را برای هر مسئله نشان می‌دهد که محور افقی، نشانگر بعد مسئله یا تعداد تکرار و محور عمودی، نشانگر نرخ ورود تقاضاست. بنابراین مشاهده می‌شود که وقتی مسئله بین بعد ۱ و ۲ قرار دارد، نرخ ورود تقاضا رو به افزایش است و درنهایت بعد از پیک خود، تا سطح حدود ۶۰۰۰ پایین می‌آید و از ابعاد ۳ به بعد، نمودار نرخ ورود تقاضا ثابت می‌شود.



شکل ۲- نمودار زمان خدمت‌رسانی(U)

Fig. 2- Service time diagram

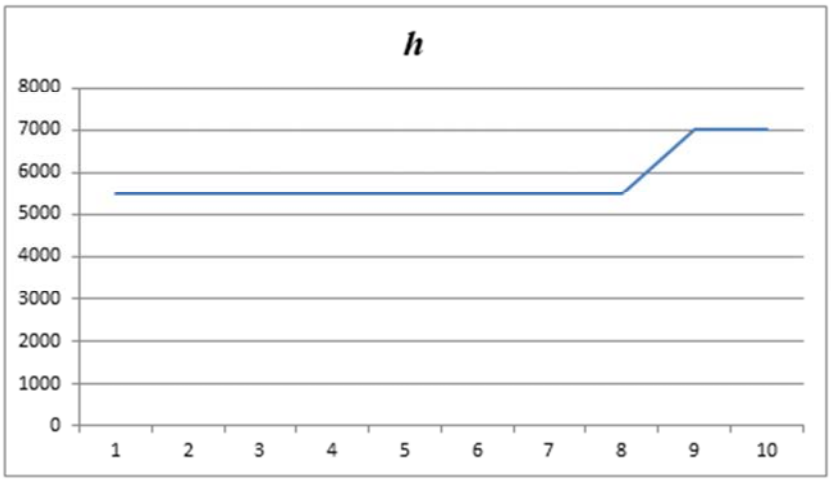
نمودار شکل ۲، زمان تغییرات خدمت‌رسانی را برای هر مسئله نشان می‌دهد. محور افقی نشانگر بعد مسئله (تعداد تکرار) و محور عمودی، نشانگر زمان خدمت‌رسانی به تفکیک هر مسئله است. تغییرات زمان خدمت‌رسانی در بازهٔ ۴۵۰۰ تا ۷۰۰۰ واحد قرار گرفته است و پیک نمودار برای مسئله با بعد چهارم رخ می‌دهد و بعد از آن، نرخ تغییرات ثابت خواهد شد.



شکل ۳- نمودار زمان رسیدن تدارکات (v)

Fig. 3- Logistics arrival time diagram

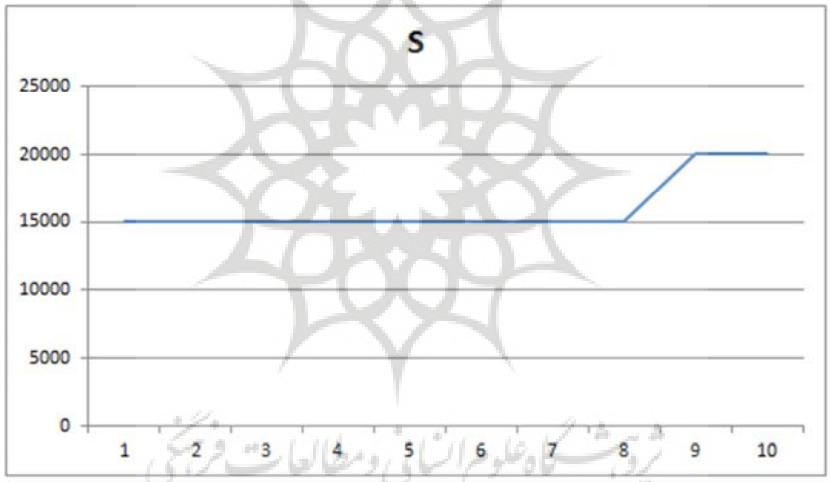
در نمودار شکل ۳، مشخص است که در بُعدهای زیر ۴ نرخ، زمان رسیدن تدارکات ثابت و بین ۸۰۰۰ تا ۹۰۰۰ واحد قرار دارد؛ اما در مسئلهٔ پنجم، نرخ زمان به پایین‌ترین حد خود در ۴۰۰۰ می‌رسد؛ سپس دوباره و بعد از گذر از بعد هفتم، روی خط ثابت ۸۰۰۰ واحد، قرار می‌گیرد.



شکل۴- نمودار هزینهٔ هر واحد از موجودی (h)

Fig.4- Chart of cost per unit of inventory

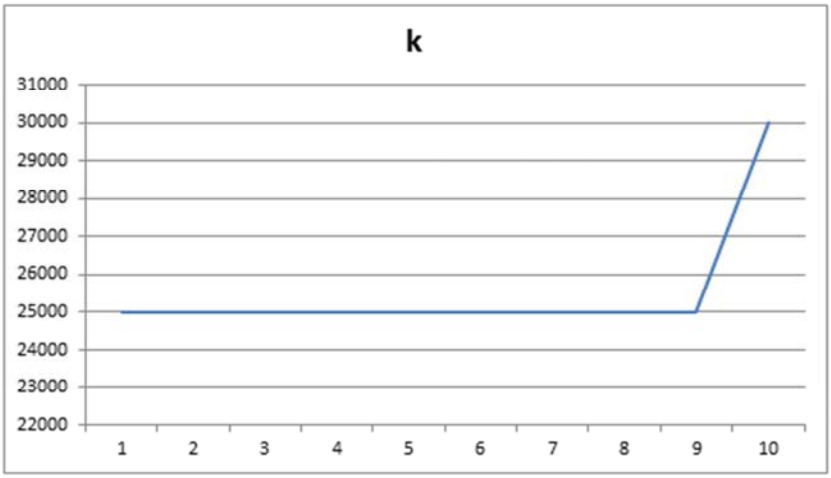
در نمودار شکل ۴، مشاهده می‌شود که نرخ هزینهٔ هر واحد از موجودی تا مسائل کمتر از ۸ بعد ثابت و بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ واحد قرار دارد تا اینکه در بعد نهم، به ۷۰۰۰ می‌رسد و سپس ثابت می‌ماند.



شکل۵- نمودار هزینهٔ هر واحد فروش از دست رفته (s)

Fig.5- Cost per lost sales chart

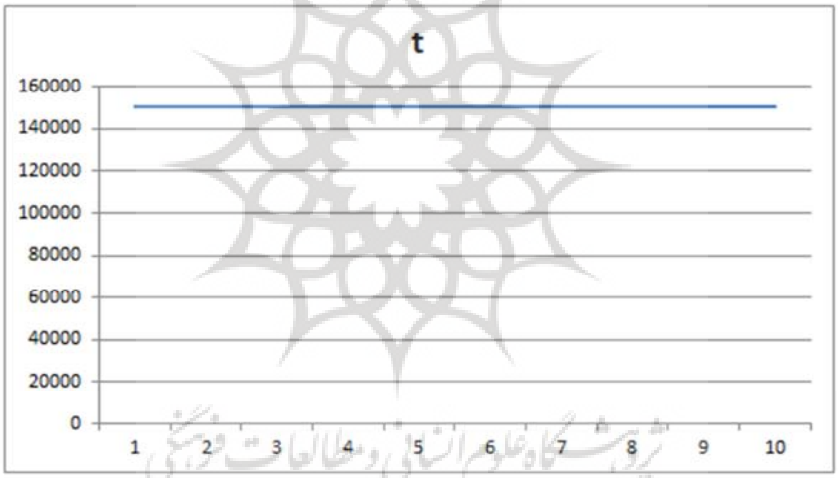
در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود که تا بعد هشتم، هزینهٔ هر واحد فروش از دست رفته ثابت و برابر با ۱۵۰۰۰ واحد بود، اما در بعد نهم به ۲۰۰۰۰ واحد می‌رسد و پس از آن روی ۲۰۰۰۰، واحد ثابت می‌ماند.



شکل۶- نمودار هزینهٔ هر بار سفارش‌دهی (k)

Fig. 6- Chart of the cost of each order

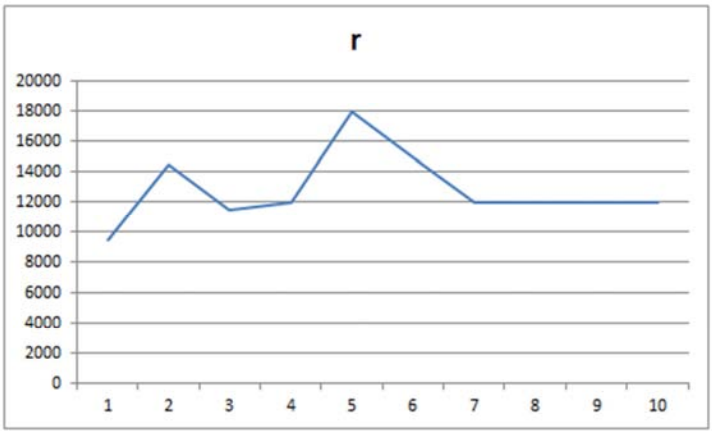
نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد تا بعد نهم، هزینهٔ هر بار سفارش‌دهی بر ۲۵۰۰۰ واحد ثابت بوده است، اما با جهشی با شیب تند، به مقدار ۳۰۰۰۰ رسیده است.



شکل۷- نمودار هزینهٔ انتظار هر مشتری (t)

Fig.7- Chart of waiting cost per customer

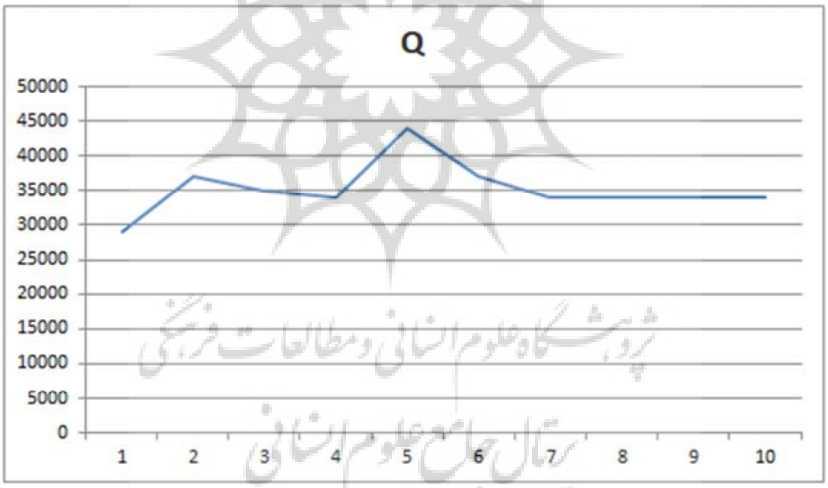
نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد هزینهٔ انتظار هر مشتری در طول ابعاد مسئله، همواره ثابت و بین ۱۴۰۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰۰ قرار گرفته است.



شکل۸- نمودار مقدار موجودی (r)

Fig. 8- Inventory amount chart

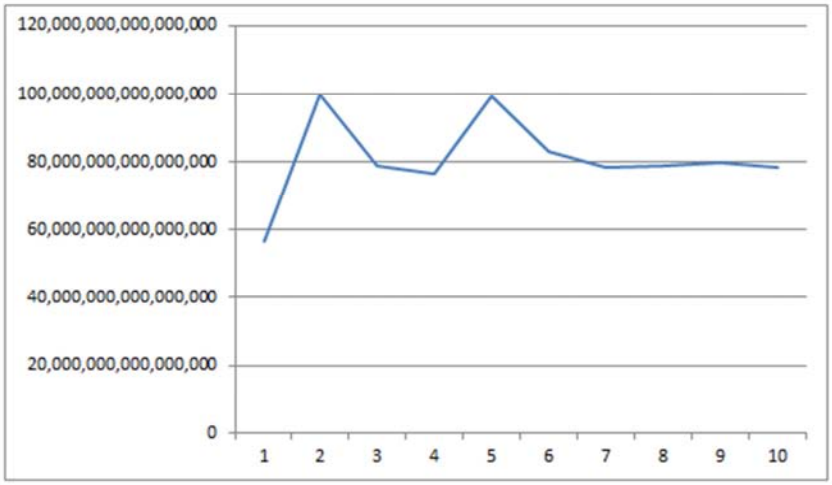
نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد بیشترین تغییرات بین متغیرها، به مقدار موجودی مربوط است، به‌طوری که مقدار آن از نزدیک به ۱۰۰۰۰ واحد برای بعد اول شروع و پس از افزایش مقدار، تا میزان بیش از ۱۴۰۰۰ در بعد دوم، با شیب کاهشی مواجه می‌شود و در بعد سوم، به کمتر از ۱۲۰۰۰ واحد می‌رسد. در ادامه با شیب ملایم افزایشی در بعد چهارم، به مقدار ۱۲۰۰۰ و ناگهان در بعد پنجم، به مقدار پیک خود در ۱۸۰۰۰ واحد می‌رسد؛ سپس با شیب زیاد کاهش می‌یابد تا به سطح ۱۲۰۰۰ در ابعاد هفتم به بالا برسد و ثابت شود.



شکل۹- نمودار مقدار اقتصادی سفارش (Q)

Fig.9- Chart of the economic value of the order

نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد مقدار اقتصادی سفارش در بعد اول با مقدار حدود ۳۰۰۰۰ واحد آغاز می‌شود و با شیب رو به بالا، به مقدار بالاتر از ۳۵۰۰۰ واحد در بعد دوم می‌رسد؛ سپس نمودار مقدار اقتصادی سفارش تا بعد چهارم کاهش می‌یابد و به میزان زیر ۳۵۰۰۰ واحد می‌رسد. اما در بعد پنجم، پیک نمودار رخ می‌دهد و مقدار اقتصادی سفارش، به بالاترین مقدار خود، یعنی حدود ۴۵۰۰۰ واحد می‌رسد؛ سپس مجدد با شیب کاهشی مواجه می‌شود تا در بعد هفتم، به مقدار نزدیک ۳۵۰۰۰ برسد و در این مقدار، ثابت شود.



شکل ۱۰- نمودار هزینهٔ کل سیستم

Fig. 10- Cost diagram of the whole system

درنهایت در نمودار شکل ۱۰، تغییرات هزینهٔ کل سیستم مشاهده می‌شود. در این نمودار، مقدار هزینهٔ کل سیستم در بعد اول از مقدار نزدیک به 6×10^{16} واحد شروع می‌شود و در بعد دوم، به مقدار پیک 10×10^{16} می‌رسد؛ سپس در بعد سوم و چهارم، تا مقدار 8×10^{16} کاهش می‌یابد.

۵. یافته‌ها و بحث

تحقیق حاضر در زمینهٔ مدیریت موجودی قطعات یدکی برای وسایل نقلیهٔ نظامی، استفاده از الگوریتم‌های پیچیده و فراابتکاری، مانند الگوریتم‌های ژنتیک، برای بهینه‌سازی و کنترل سیستم‌های موجودی را برجسته می‌کند. این رویکرد با مطالعات قبلی، مانند مطالعات یوهانسمن و همکاران (۲۰۱۹) متمایز است که از روش‌های کیفی و تحلیل‌های موردی استفاده می‌کردند. در حالی که این روش‌ها، بینش‌های ارزشمندی را ارائه می‌دهند، راه‌حل‌های کمی در این تحقیق با هدف رسیدگی به چالش‌ها در محیط‌هایی که با عدم قطعیت بالا مشخص شده‌اند، به تصمیم‌گیری سریع و دقیق، به‌ویژه در بخش‌های نظامی و دفاعی نیاز دارند. در اینجا، اثربخشی این فناوری‌ها برای افزایش بهره‌وری و بهره‌وری عملیاتی بسیار مهم است؛ زیرا مدیریت بهتر منابع و کاهش ضایعات را تسهیل می‌کنند.

سیستم موجودی بحث‌شده در این تحقیق، چندین معیار پیچیده را برای اطمینان از کارایی ترکیب می‌کند. مؤلفه‌های کلیدی مانند نرخ ورود تقاضا، که برای پرکردن قطعات خودروهای نظامی حیاتی است، با استفاده از توزیع پواسون مدل‌سازی می‌شوند. علاوه بر این، زمان خدمت یا زمانی که برای رسیدگی به تقاضا نیاز است، از یک توزیع تصاعدی پیروی می‌کند که منعکس‌کنندهٔ فوریت و پیش‌بینی‌ناپذیربودن مرتبط با لجستیک نظامی است. هر واحد موجودی، هزینهٔ خاصی را متحمل می‌شود و تقاضاهای برآورده‌نشده، به از دست رفتن هزینه‌های فروش منجر می‌شود که به‌طور درخور توجهی بر هزینه‌های کل سیستم تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، هر تعامل یا سفارش مشتری بر هزینه‌ها افزوده می‌شود و بر استراتژی اقتصادی کلی سیستم موجودی تأثیر می‌گذارد.

به‌طور چشمگیری، ارزش اقتصادی یک سفارش به‌عنوان مقرون به‌صرفه‌ترین نقطه برای سیستم تعیین می‌شود. این کار ازطریق مدل‌سازی پیچیده تعیین می‌شود، جایی که هزینه به زیر یک آستانهٔ معین کاهش می‌یابد و آن را به مقدار

سفارش بهینه تبدیل می‌کند. بنابراین سطح موجودی سیستم براساس این مقدار تنظیم و اطمینان حاصل می‌شود که هزینه‌های عملیاتی به حداقل می‌رسد و در عین حال، سطوح خدمات مورد نیاز را برآورده می‌کند. این تعادل در حفظ آمادگی و کارایی در عملیات نظامی حیاتی است که در آن اختلالات زنجیرهٔ تأمین عواقب شدیدی دارد.

یافته‌های تحقیق نشان داده شده در نمودار شکل ۱۱ و جدول ۳، نشان می‌دهد که ارزش هزینهٔ بهینهٔ سیستم و ارزش سفارش اقتصادی در طول تکرارهای خاص مدل، یعنی تکرارهای اول، چهارم و دهم به دست می‌آید. این نقاط اثربخشی ادغام توزیع‌های پواسون و نمایی را در مدل نشان می‌دهند و عملکرد سیستم را در سناریوهای مختلف بهینه می‌کنند. چنین نتایجی بر سازگاری و استحکام استراتژی مدیریت موجودی پیشنهادی، به‌ویژه در شرایط نوسان تقاضا و چالش‌های عرضه، تأکید می‌کند.

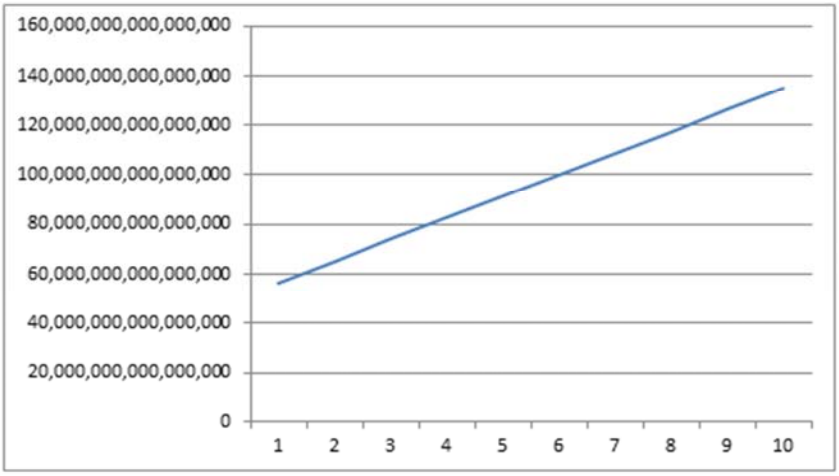
همان‌طور که مدل در معرض تکرارهای بیشتر قرار می‌گیرد، تفاوت‌هایی در نتایج مشاهده می‌شود که پتانسیل تغییرپذیری را با افزایش تکرار نشان می‌دهد؛ برای مثال، اگر مدل ۱۰۰ مشکل یا سناریوی مختلف را در نظر بگیرد، ممکن است نتایج متفاوتی ظاهر شود، اگرچه یک ثبات کلی در رفتار سیستم ذکر شده است. این مسئله نشان‌دهندهٔ انعطاف‌پذیری در رویکرد مدل‌سازی است، جایی که بعید است تغییرات درخور توجه در پارامترهایی مانند هزینه‌های موجودی یا زمان عرضه، ارزش اقتصادی یا کارایی سیستم را به‌شدت تغییر دهد.

نوآوری تحقیق حاضر در مدل و روش حل آن نهفته است. در این تحقیق، مدلی برای بهینه‌سازی سطح موجودی قطعات یدکی خودروهای نظامی، با استفاده از توزیع احتمال ترکیبی ارائه و به‌خصوص برای مواجهه با شرایط تحریم و دسترسی محدود به بازارهای جهانی طراحی شده است. این مدل به‌وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک حل‌شده است که یک روش فراابتکاری برای یافتن راه‌حل‌های بهینه در مسائل پیچیده و غیرخطی است و تفاوت بنیادینی با کار یوهانسمن و همکاران (۲۰۱۹) دارد که تمرکز بیشتری بر رویکردهای کیفی و مطالعات موردی داشته‌اند. تحقیق حاضر با ارائهٔ یک رویکرد کمی و اعمال الگوریتم ژنتیک، امکان مدیریت دقیق‌تر و علمی‌تر سطوح موجودی را در شرایط بحرانی فراهم می‌آورد و به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در زمینهٔ لجستیک نظامی کمک شایانی می‌کند. نتایج تحلیل حساسیت بر متغیر نرخ ورودی تقاضا به سیستم در جدول ۳ و نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت بر متغیر نرخ ورودی تقاضا به سیستم

Table3. Results of sensitivity analysis on the demand input rate variable to the system

ردیف	λ	U	v	h	s	k	t	r	Q	هزینه سیستم
۱	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۶,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	۷۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۵,۲۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	۸۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۷۳,۹۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۴	۹۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۸۲,۶۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۵	۱۰۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۹۱,۳۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۶	۱۱۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۱۰۰,۰۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	۱۲۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۱۰۸,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۸	۱۳۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۱۱۷,۴۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۹	۱۴۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۱۲۶,۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	۱۵۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۱۳۴,۸۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰



شکل ۱۱- نمودار تحلیل حساسیت ورودی تقاضا به سیستم

Fig. 11- Diagram of sensitivity analysis of demand input to the system

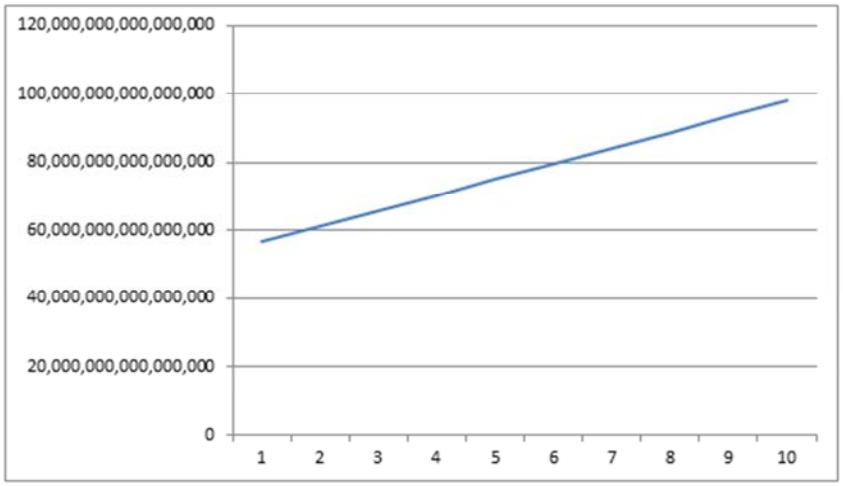
جدول۳ و نمودار شکل ۱۱، نشانگر تحلیل حساسیت ورودی تقاضا به سیستم است که محور افقی نشانگر بعد مسئله و محور عمودی، نشانگر ورودی تقاضاست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ورود تقاضا به سیستم، هزینهٔ کل به‌صورت تصاعدی با شیب تند افزایش می‌یابد که این امر نشانگر حساسیت بالای مدل به پارامتر ورود تقاضاست؛ بنابراین ورود تقاضا به‌شدت بر مدل تأثیرگذار بوده است.

جدول ۴ و نمودار شکل ۱۲، نتایج تحلیل حساسیت متغیر زمان خدمت‌رسانی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- تحلیل حساسیت متغیر زمان خدمت‌رسانی

Table4. Sensitivity analysis of service time variable

ردیف	λ	U	v	h	s	k	t	r	Q	هزینه سیستم
۱	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۶,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	۶۵۰۰۰	۶۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۱,۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۵,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۴	۶۵۰۰۰	۷۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۷۰,۳۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۵	۶۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۷۴,۹۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۶	۶۵۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۷۹,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	۶۵۰۰۰	۸۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۸۴,۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۸	۶۵۰۰۰	۹۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۸۸,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۹	۶۵۰۰۰	۹۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۹۳,۳۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	۶۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۹۷,۹۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰



شکل ۱۲- نمودار تحلیل حساسیت زمان خدمت‌رسانی

Fig.12- Service time sensitivity analysis diagram

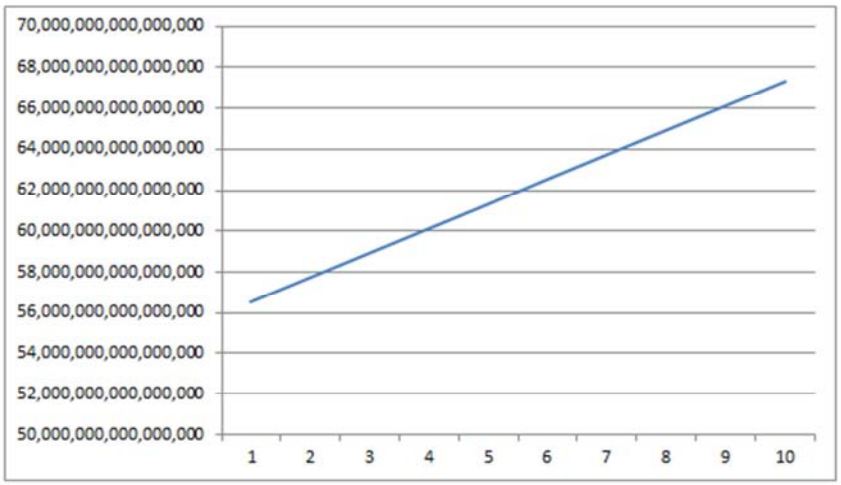
در جدول ۴ و نمودار شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که زمان خدمت‌رسانی به افزایش هزینهٔ سیستم به شکل مشهودی نیز می‌شود. ضمن اینکه این افزایش شیب تند صعودی دارد؛ بنابراین مدل نسبت‌به افزایش زمان خدمت‌رسانی حساسیت دارد.

در جدول ۵ و نمودار شکل ۱۳، نتایج تحلیل حساسیت متغیر و زمان رسیدن تدارکات نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج تحلیل حساسیت متغیر زمان رسیدن تدارکات

Table5. The results of the sensitivity analysis of the logistics arrival time variable

ردیف	λ	U	v	h	s	k	t	r	Q	هزینه سیستم
۱	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۶,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۷,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۱۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۸,۹۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۴	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۰,۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۵	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۴۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۱,۳۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۶	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۶۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۲,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۷۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۳,۷۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۸	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۹۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۴,۹۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۹	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۲۱۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۶,۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۲۳۰۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۷,۳۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰



شکل ۱۳- نمودار نتایج تحلیل حساسیت متغیر زمان رسیدن تدارکات

Fig. 13- The graph of the results of the variable sensitivity analysis of the logistics arrival time

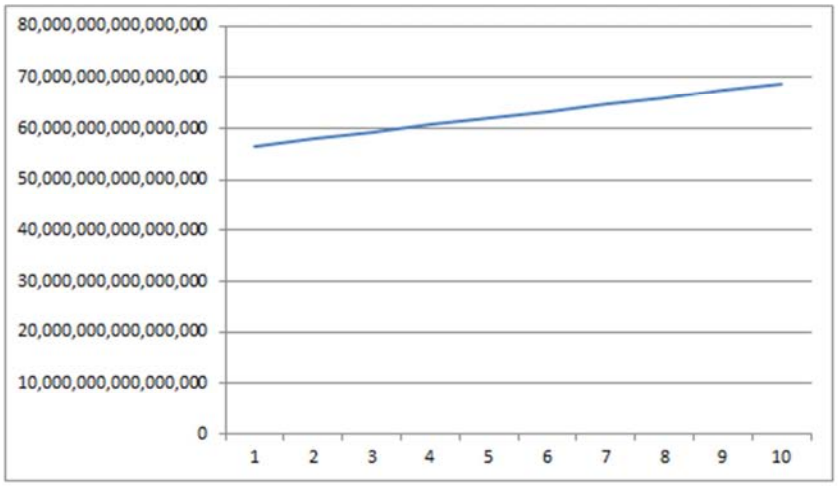
در جدول ۵ و نمودار شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که زمان رسیدن تدارکات تأثیر بسیاری بر هزینهٔ کل سیستم داشته است و شیب صعودی تندتری نسبت‌به متغیر قبلی، یعنی زمان خدمت‌رسانی دارد. به عبارت دیگر، زمان رسیدن تدارکات نسبت‌به زمان خدمت‌رسانی بر هزینه‌های سیستم تأثیر بیشتری داشته است و به این موضوع، توجه بیشتری مبذول می‌شود.

در جدول ۶ و نمودار شکل ۱۴، نتایج تحلیل حساسیت متغیر هزینهٔ هر واحد موجودی نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج تحلیل حساسیت متغیر هزینهٔ هر واحد موجودی

Table6. The results of the sensitivity analysis of the variable cost of each inventory unit

ردیف	λ	U	v	h	s	k	t	r	Q	هزینه سیستم
۱	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۶,۵۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۲	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۷,۹۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۳	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۵۹,۲۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۴	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۰,۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۵	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۱,۹۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۶	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۳,۳۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۷	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۴,۶۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۸	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۶,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۹	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۷,۳۵۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰
۱۰	۶۵۰۰۰	۵۵۰۰۰	۸۵۰۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۹۵۰۰	۲۹۰۰۰	۶۸,۷۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰



شکل۱۴- نمودار نتایج تحلیل حساسیت متغیر هزینهٔ هر واحد موجودی

Fig. 14- Diagram of the results of sensitivity analysis of the variable cost of each inventory unit

طبق جدول ۷ و نمودار شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که شیب افزایش هزینهٔ ناشی از هزینهٔ هر واحد موجودی، شیب نسبتاً ملایمی دارد، اما به‌طور کلی تأثیرپذیری و به‌اصطلاح حساسیت مدل نسبت‌به افزایش هزینهٔ هر واحد موجودی تأیید می‌شود، ولی این تأثیر نسبت‌به سه متغیر قبل ملایم‌تر بوده است.

همان‌طور که ملاحظه شد، مدل توزیع احتمال ترکیبی برای بهینه‌سازی سفارش با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شد. ابتدا حل مدل در ابعاد مختلف انجام شد و در ده بعد بررسی‌شده یا ده تکرار، مشخص شد کدام تکرارها شامل بهینه‌ترین میزان سفارش‌دهی ازنظر هزینهٔ کل سیستم‌اند. تکرار اول بهینه‌ترین تکرار تعیین و تکرارهای چهارم و دهم نیز تکرارهای نسبتاً بهینه تلقی شدند. در این بخش، ابعاد مسئله در هر تکرار تا اندازه‌ای تغییر می‌یافت که نتایج فوق حاصل شد. در ادامه، تحلیل حساسیت مدل انجام شد. در بخش تحلیل حساسیت، ۴ پارامتر هزینهٔ هر واحد موجودی، زمان خدمت‌رسانی، زمان رسیدن تدارکات و نرخ ورود تقاضا، پارامترهای اثرگذار بر کل مدل تعیین شد؛ هرچند تمامی پارامترها در مدل بررسی‌شدنی بودند و به نظر محقق، ۴ پارامتر فوق تعیین شد. نتایج نشان داد مدل یا میزان بهینهٔ هزینه به تمامی پارامترها واکنش نشان می‌دهد و به‌اصطلاح حساسیت دارد. این در حالی است که زمان رسیدن تدارکات بیشترین اثر را نشان می‌دهد؛ زیرا دارای یک شیب تند خطی است، اما پارامتری نظیر هزینهٔ هر واحد موجودی، کمترین اثر را دارد؛ زیرا دارای یک شیب خطی ملایم است.

۶. توصیه‌های مدیریتی

با توجه به شرایط خاص تحریم و محدودیت‌های دسترسی به بازارهای بین‌المللی، مدیریت دقیق موجودی، به‌عنوان یک ابزار کلیدی برای حفظ کارایی و پایداری در عملیات نظامی عمل می‌کند. این تحقیق توصیه می‌کند که سازمان‌های مربوطه با استفاده از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مانند الگوریتم ژنتیک، به‌طور مداوم سطوح موجودی خود را تحلیل و بهینه‌سازی می‌کنند تا از هزینه‌های اضافی جلوگیری به عمل آید و در عین حال، تأمین قطعات در زمان‌های مورد نیاز مطمئن شود.

۷. نتیجه‌گیری

یافته‌های تحقیق حاضر نشان‌دهندهٔ دستیابی به مقدار بهینهٔ سفارش برای رسیدن به حداقل هزینه است. در این مدل، حل اولیه به شناسایی مقداری از سفارش منجر شد که کمترین هزینه را به‌دنبال داشت. با تغییر پارامترها، مقادیر بهینه برای سفارش دوباره تعیین شدند و تکرار اول، بهترین تکرار برای رسیدن به این هدف مشخص شد.

جدول ۷- بهترین مقدار پارامترهای به دست آمده

Table7. The best value of obtained parameters

پارامتر	مقدار
لاندا	۶۵۰۰۰
u	۵۵۰۰۰
V	۸۵۰۰
C	۳۵۰۰
H	۵۵۰۰
S	۱۵۰۰۰
K	۲۵۰۰۰
T	۱۵۰۰۰۰
R	۹۵۰۰
Q	۲۹۰۰۰

پارامترهای فوق، مربوط به تکرار اول است که مقدار بهینهٔ آنها در جدول ۷ ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل حساسیت، تأثیر درخور توجه چهار پارامتر کلیدی را بر مدل برجسته می‌کند. زمان رسیدن منابع بیشترین تأثیر را دارد، اگرچه تأثیر پارامترهای ورودی تقاضا و زمان خدمات نیز، قوی است. گفتنی است که تأثیر هزینهٔ هر واحد موجودی، کمتر مشخص است، اما همچنان مرتبط است و تأثیر ملایم و در عین حال درخور توجهی بر مدل نشان می‌دهد. این مطالعه اهمیت این پارامترها را نشان می‌دهد و تجزیه و تحلیل حساسیت بیشتر را با پارامترهای اضافی، مانند هزینهٔ فروش از دست رفته، هزینه‌های سفارش و انتظار مشتری را توصیه می‌کند که احتمالاً بر مدل بهینه‌سازی موجودی تأثیر می‌گذارد.

بر این اساس، مدل توزیع احتمال ترکیبی برای بهینه‌سازی سفارش با استفاده از الگوریتم ژنتیک، در ابعاد مختلف انجام و در ده تکرار (با تغییر ابعاد مسئله در هر تکرار) مشخص شد که کدام تکرارها شامل بهینه‌ترین میزان سفارش‌دهی ازنظر هزینهٔ کل سیستم است. در این باره تکرار اول، بهینه‌ترین تکرار تعیین‌شده و تکرارهای چهارم و دهم نیز، تکرارهای نسبتاً بهینه‌اند. در ادامه نیز، تحلیل حساسیت مدل انجام شد که در این راستا چهار عامل هزینهٔ هر واحد موجودی، زمان خدمت‌رسانی، زمان رسیدن تدارکات و نرخ ورود تقاضا، عوامل تأثیرگذار بر کل مدل تعیین شدند و مشخص شد که میزان بهینهٔ هزینه به تمامی پارامترهای بررسی‌شده حساسیت داشته است، به‌نحوی که زمان رسیدن تدارکات بیشترین اثر و متغیر هزینهٔ هر واحد موجودی، کمترین اثر را می‌گذارند.

این تحقیق، فرضیات بررسی‌شدنی را برای پژوهش‌های آتی فراهم می‌کند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، یافته‌های پژوهش حاضر با انتخاب روش‌های تجزیه و تحلیل متفاوت بررسی و مقایسه شود.

در این راستا برای انجام تحقیقات آتی، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- استفاده از دیگر توزیع‌ها، که در پیشینهٔ تحقیق برای تعیین سطح موجودی استفاده شده است، برای یک توزیع احتمال ترکیبی جدید؛
- استفاده از تحلیل‌های آماری در کنار روش‌های فراابتکاری برای بررسی و تحلیل حساسیت مدل‌های بهینه‌سازی سطح موجودی؛
- استفاده از دیگر روش‌های فراابتکاری، مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۲۴]؛
- همچنین در تحقیقات آتی، متغیرهای متفاوت و مدل متفاوتی انتخاب می‌شود.

References

Ahmed, W., Jalees, M., Omair, M., Mukhtar, Z., & Imran, M. (2022). An inventory management for global supply chain through reworking of defective items having positive inventory level undermulti-trade-credit-period. *Annals of Operations Research*, *315*(1), 1-28. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04646-y

Bertazzi, L., Bosco, A., & Laganà, D. (2015). Managing stochastic demand in an inventory routing problem with transportation procurement. *Omega*, *56*, 112-121. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.09.010

Chekoubi, Z., Trabelsi, W., Sauer, N., & Majdouline, I. (2022). The Integrated Production-Inventory-Routing Problem with Reverse Logistics and Remanufacturing: A Two-Phase Decomposition Heuristic. *Sustainability*, *14*(20), 13563. https://doi.org/10.3390/su142013563

Chu, J. C., Yan, S., & Huang, H. J. (2017). A multi-trip split-delivery vehicle routing problem with time windows for inventory replenishment under stochastic travel times. *Networks and Spatial Economics*, *17*, 41-68. https://doi.org/10.3390/math10193527

Graham, J. (1967). Turbine Engines in Transport Aircraft—Some Observations on Reliability and Safety in Operation. *The Aeronautical Journal,* *71*(682), 692-696. https://doi.org/10.1017/S0001924000054336

hannsmann, L. M., Craparo, E. M., Dieken, T. L., Fügenschuh, A. R., & Seitner, B. O. (2022). Stochastic mixed-integer programming for a spare parts inventory management problem. *Computers & Operations Research*, *138,* 105568. http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2021.105568

Juan, A. A., Grasman, S. E., Caceres-Cruz, J., & Bektaş, T. (2014). A simheuristic algorithm for the single-period stochastic inventory-routing problem with stock-outs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *46*, 40-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2013.11.008

Lin, C. K., Yan, S., & Hsiao, F. Y. (2021). Optimal Inventory Level Control and Replenishment Plan for Retailers. *Networks and Spatial Economics, 21*, 57-83. http://dx.doi.org/10.1007/s11067-020-09503-8

Liu, M., Liu, X., Chu, F., Zheng, F., & Chu, C. (2019). Distributionally robust inventory routing problem to maximize the service level under limited budget. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *126,* 190-211. https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.04.005

Moon, S., & Kim, U. J. (2017). The development of a concurrent spare-parts optimization model for weapon systems in the South Korean military forces. *Interfaces*, *47*(2), 122-136. https://doi.org/10.1287/inte.2016.0869

Rezaei, H., Baboli, A., Shahzad, M. K., & Tonadre, R. (2018). A new methodology to optimize target stock level for unpredictable demand of spare parts: A Case Study in Business Aircrafts' Industry. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 538-543. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.374

Shahabi, M., Akbarinasaji, S., Unnikrishnan, A., & James, R. (2013). Integrated inventory control and facility location decisions in a multi-echelon supply chain network with hubs. *Networks and Spatial Economics*, *13*, 497-514. http://dx.doi.org/10.1007/s11067-013-9196-4

Sleptchenko, A., & van der Heijden, M. (2016). Joint optimization of redundancy level and spare part inventories. *Reliability Engineering & System Safety*, *153*, 64-74. https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.04.006

Johannessen, L. K., Keitsch, M. M., & Pettersen, I. N. (2019). *Speculative and critical design—features, methods, and practices*. [In Proceedings of the design society: international conference on engineering design] .Cambridge University Press. http://dx.doi.org/10.1017/dsi.2019.168

Taleizadeh, A. A., & Zamani-Dehkordi, N. (2017). Optimizing setup cost in (R, T) inventory system model with imperfect production process, quality improvement, and partial backordering. *Journal of Remanufacturing*, *7*, 199-215. https://doi.org/10.1007/s13243-017-0040-8

Tiwari, S., Daryanto, Y., & Wee, H. M. (2018). Sustainable inventory management with deteriorating and imperfect quality items considering carbon emission. *Journal of Cleaner Production*, *192*, 281-292. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.261

Zhang, L., Deng, Q., Miao, B., Liu, X., & Shao, H. (2022). Parallel service mode of production and inventory for spare part inventory optimization. *Knowledge-Based Systems*, *241*, 108282. https://doi.org/10.3390/su122310117

Zhang, S., Huang, K., & Yuan, Y. (2021). Spare parts inventory management: A literature review. *Sustainability*, *13*(5), 2460. https://doi.org/10.3390/su13052460

[1] Sleptchenko & van der Heijdenm
[2] Shahabi et al.
[3] Bertazzi et al.
[4] Chu et al.
[5] Chekoubi et al.
[6] Zhang et al.
[7] Liu et al.
[8] Taleizadeh & Zamani-Dehkordi
[9] hannsmann et al.
[10] Rezaei et al.
[11] Juan et al.
[12] Lin et al.
[13] Moon & Kim
[14] Failure Rate
[15] Weibull Distribution
[16] Homogeneous Poisson process
[17] Failure Rate
[18] Weibull Distribution
[19] Tiwari et al.
[20] Ahmed et al.
[21] Graham
[22] Johannessen et al.
[23] Poisson process
[24] Particle Swarm Optimization

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی