

**Paper Type: Original Article**

Designing a Mathematical Model of Spare Parts Supply Chain in a Defense Organization under Uncertainty

Hassan Fattahi^{1,*}, Mohammad Ali Javadzade¹

¹ Department of Artificial Intelligence and Robotics, Faculty and Research Institute of Artificial Intelligence and Cognitive Sciences, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran; hasanfatahi77@ihu.ac.ir; javadzade@ihu.ac.ir.

Citation:

Fattahi, H., & Javadzade, M. A. (2024). Designing a mathematical model of spare parts supply chain in a defense organization under uncertainty. *Management: Modeling, analysis and applications*, 1(4), 227-243.

Received: 13/02/2024

Reviewed: 27/06/2024

Revised: 09/07/2024

Accepted: 18/08/2024

Abstract

Purpose: Timely provision of spare parts is one of the essential requirements for the operational readiness of defense systems and a strategy for enhancing service levels in operational units. This study presents and solves a model for the spare parts supply chain in a defense organization under conditions of uncertainty.

Methodology: Given that the proposed mathematical model for the spare parts supply chain in the defense organization is of the NP-hard type, metaheuristic methods are employed to solve it. These methods produce near-optimal solutions within a reasonable time compared to exact methods. In this study, the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), a multi-objective genetic algorithm, has been used to solve the model.

Findings: To demonstrate the effectiveness of the NSGA-II algorithm, its results were compared with those obtained from solving the mathematical model using the exact Ames method. The findings indicate that the average percentage difference between the proposed algorithm and the exact method is less than 1%. Moreover, the time required to reach a solution using the proposed algorithm is significantly lower than that of the exact method. Therefore, the proposed algorithm converges to an optimal and efficient solution.

Originality/Value: Due to the numerous constraints in the mathematical model of the spare parts supply chain problem for a defense organization, and the pursuit of multiple objectives such as cost minimization and increased responsiveness, the real-world dimensions of this problem are large. Achieving an optimal solution through exact methods within a reasonable time frame is not feasible. This highlights the necessity of employing metaheuristic approaches for such problems. The results indicate that the average execution time for P31–P39 using AIMMS software is approximately 2510, whereas the metaheuristic NSGA-II algorithm achieves an average time of around 479, demonstrating the superior efficiency of the metaheuristic algorithm compared to the exact solution method.

Keywords: Supply chain, Spare parts, Uncertainty, Metaheuristic algorithms, Multi-objective genetic algorithm.



Corresponding Author: hasanfatahi77@ihu.ac.ir

<https://doi.org/10.22105/mmaa.vi.76>

Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



۶

نوع مقاله: پژوهشی

طراحی مدل ریاضی زنجیره تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی در شرایط عدم قطعیت

حسن فتاحی^۱، محمدعلی جوادزاده^۱

^۱گروه هوش مصنوعی و رباتیک، دانشکده و پژوهشکده هوش مصنوعی و علوم شناختی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

چکیده

هدف: تامین به موقع قطعات یدکی یکی از الزامات آماده به کار بودن سیستم های دفاعی و راهکارهای افزایش سطح خدمت در یگان های عملیاتی است. این تحقیق، مدلی برای زنجیره تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی در شرایط عدم قطعیت ارائه و حل می کند.

روش شناسی پژوهش: با توجه به این که مدل ریاضی پیشنهادی برای زنجیره تامین قطعات یدکی در سازمان دفاعی، از نوع مسایل پیچیده (NP -hard) می باشد، از روش های فراابتکاری برای حل آن استفاده می شود که در زمان معقولی نسبت به روش های دقیق، جواب های نزدیک به بهینه تولید می کنند. در این پژوهش، از الگوریتم های فراابتکاری ژنتیک رتبه بندی نامغلوب^۱ برای حل این مدل استفاده شده است.

یافته ها: برای اثبات کارایی الگوریتم $NSGA-II$ ، نتایج آن با نتایج حل مدل ریاضی توسط روش دقیق ایمز مقایسه شده است که نتایج نشان می دهد متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با روش دقیق، کمتر از ۱% می باشد. در ضمن زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش دقیق، به مراتب پایین تر است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی، همگرا به جواب بهینه و کارا می باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: از آن جا که در مدل ریاضی مساله زنجیره تامین قطعات یدکی یک سازمان دفاعی، محدودیت های بسیاری وجود دارد و اهداف چندگانه از جمله کمینه سازی هزینه و افزایش سطح پاسخ گویی دنبال می شود، ابعاد این مساله دنیای واقعی بزرگ می باشد و رسیدن به جواب بهینه با روش های دقیق (در زمان معقول) امکان پذیر نیست. این موضوع، ضرورت به کارگیری روش های فراابتکاری در چنین مسایلی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که متوسط زمان اجرای $P31-P39$ توسط نرم افزار ایمز حدود ۲۵۱۰ و توسط الگوریتم فراابتکاری $NSGA-II$ در حدود ۴۷۹ می باشد که نشان از کارایی بالای الگوریتم فراابتکاری نسبت به روش حل دقیق دارد.

کلیدواژه ها: زنجیره تامین، قطعات یدکی، عدم قطعیت، الگوریتم های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک چندهدفه.

۱- مقدمه و بیان مساله

هر سیستم تولیدی از قطعات و اجزای مختلفی تشکیل شده است که این سیستم تولیدی لازم است برای تولید محصول، بدون کاهش عملکرد، وظیفه خود را به خوبی انجام دهد. اما در گذر زمان ممکن است خرابی هایی در هر یک از قطعات سیستم رخ دهد که اجتناب ناپذیر هستند. این خرابی ها می توانند منجر به بروز وقفه در فرآیند تولید و عدم دستیابی به اهداف تولیدی شوند که در صورت وجود تقاضا برای محصول، منجر به از دست دادن تقاضا یا فرصت سودآوری می گردند. پس باید زمان ازکارافتادگی سیستم ها را به حداقل رسانید. برای به حداقل رساندن زمان ازکارافتادگی سیستم ها، قطعات یدکی باید همواره در دسترس باشند. از طرفی، خرید و نگهداری قطعات یدکی عموماً پرهزینه است و علاوه بر این، این قطعات ریسک منسوخ شدگی بالایی دارند. لذا مدیریت صحیح موجودی قطعات یدکی، نقش مهمی در مدیریت هزینه های سیستم دارد. از طرف دیگر

^۱ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

تعداد تامین کنندگان قطعات یدکی خاص، پایین است. در واقع اگر تامین کننده اصلی، این قطعات را تامین نکند یا با اختلال مواجه شود، معمولاً باید به تامین کننده دیگری سفارش ساخت داده شود. این امر سبب می شود، قیمت و زمان تحویل به طور قابل توجهی افزایش یابد [1]. مشاهدات نشان می دهد که درصد زیادی از زمان تلف شده کارکنان تعمیر و نگهداری را می توان به قطعات یدکی نسبت داد. بررسی ها نشان داده است که درصد کمی از سازمان ها می توانند بگویند که ۹۵٪ مواقع به قطعه دسترسی داشته اند. طولانی بودن فرآیند تامین قطعات، دقیق نبودن محاسبات کنترل موجودی و خرید، مشخص نبودن اهمیت هر قطعه و ... تعدادی از مسائلی است که شرکت ها به صورت روزانه با آن مواجه هستند. هدف از مدیریت قطعات یدکی تامین قطعات مناسب، در مقدار مناسب، در مکان مناسب، در زمان مناسب، با کیفیت مناسب و با حداقل هزینه کل برای سازمان است. دامنه مدیریت قطعات یدکی، کلیه عملکردها را از زمان احساس نیاز به قطعه تا زمان مصرف آن شامل می شود. برخی از این عملیات ها، شناسایی و کدگذاری، طبقه بندی بحرانی بودن، خرید اقلام، بازرسی کیفیت کالای خریداری شده، سیاست های ذخیره سازی، مدیریت تامین کننده و ... می باشد [2]. در معروف ترین مدل های منتشر شده در حوزه تعالی نگهداری و تعمیرات و مدیریت دارایی های فیزیکی، عنصر مدیریت مواد و قطعات را می توان مشاهده نمود. همچنین در مدل تعالی نگهداری و تعمیرات وایرمن^۱ در ذیل قسمت تدارکات و ذخیره سازی به مدیریت مواد و قطعاتی که در نگهداشت و بهره برداری از تجهیزات کاربرد دارند، توجه شده است [3]. هدف از تحقیق حاضر طراحی مدلی برای زنجیره تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی می باشد که شامل دو هدف کمینه سازی هزینه و زمان می باشد به طوری که تمام پارامترهای مدل به صورت غیرقطعی (فازی) باشند. سپس با کمک یک روش دقیق و یک روش فراابتکاری چندهدفه به حل آن می پردازیم.

۲- ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

۲-۱- مدیریت زنجیره تامین

مدیریت زنجیره تامین مجموعه ای از راهکارها، جهت یکپارچه سازی اعضای زنجیره (تامین کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع کنندگان، خرده فروشان و مشتری نهایی) است که هدف آن، کاهش هزینه های سیستم و نیز افزایش سطح خدمت دهی به مشتریان است؛ بنابراین، زنجیره تامین به هر راهکاری که باعث کاهش هزینه ها می شود و نقشی در برآورده کردن نیاز مشتری ایفا می کند (از تامین کننده و امکانات تولیدی گرفته تا انبارهای مواد اولیه و مراکز توزیع و نیز خرده فروشی ها و انبارهای محصولات) توجه می کند، در واقع، در بعضی از تحلیل های زنجیره تامین ضروری است که توجه خود را به تامین کنندگان و مشتریان معطوف کنیم. بنابراین، مدیریت زنجیره تامین به دنبال یکپارچه سازی سازمان، از طریق اداره کردن تامین کنندگان و مشتریان به شکل یک "کل" می باشد و سپس همه جریان های موجود در این شبکه را هماهنگ می کند و در نتیجه این هماهنگی، محصول مناسب در اندازه و مقدار صحیح، برای مکان مناسب و در زمان صحیح، تولید و توزیع می شود [4].

۲-۲- قطعات یدکی

اکثر تحقیقات گذشته، نگهداری و تعمیرات را بر فرض دسترسی نامحدود به قطعات یدکی در نظر می گرفتند. در نظر گرفتن این فرض، باعث بالا رفتن هزینه های موجودی می شود. با در نظر گرفتن سطح بهینه موجودی قطعات یدکی، می توان در میزان هزینه های موجودی، کاهش چشم گیری مشاهده کرد. در مدیریت و کنترل موجودی در سازمان ها، باید یک توازن بین سطح موجودی قطعات یدکی و هزینه و ریسک ناشی از عدم وجود قطعه به هنگام نیاز برقرار نمود. واضح است که این سطح از موجودی قطعات یدکی متأثر از خصوصیات دستگاه ها و قابلیت اطمینان آن ها است. رویکرد سنتی در بهینه سازی فعالیت های نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی به صورت متوالی بود، یعنی به طور جداگانه فعالیت های نگهداری و تعمیرات (فواصل بازرسی، تعویض پیشگیرانه، سرحد تعویض پیشگیرانه و ...) و موجودی قطعات یدکی بهینه می شدند [3].

سعیدی سوق و همکاران [3] در تحقیق خود به بهینه سازی ترکیبی موجودی قطعات یدکی و فعالیت های نگهداری و تعمیرات پرداخته اند. در این مقاله، از شبیه سازی مونت کارلو به منظور بهینه سازی ترکیبی فعالیت های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت و موجودی قطعات یدکی استفاده شده است. از الگوریتم ژنتیک باینری به منظور پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم استفاده گردیده است. در مطالعه موردی برای شبیه سازی رویدادهای مختلف تعمیراتی، از بانک اطلاعاتی آنالیز روغن یک شرکت عمرانی شامل ۸۰۰۰ داده آنالیز روغن استفاده شده است.

¹ Terry Wireman

عامری و همکاران [1] در پژوهش خود به منظور برخورد و مقابله با برخی چالش های موجود در رابطه با مدیریت قطعات یدکی بحرانی، مدلی ریاضی به منظور تعیین مقدار سفارش بهینه در حالت اختلال تامین کننده ارائه کردند. از این رو یک سیستم تولیدی دارای چند تجهیز مختلف با اجزای بحرانی در نظر گرفته شده است که اجزای بحرانی در صورت خرابی با قطعات یدکی سالم تعویض می شوند. مدل این مقاله در شرایط اختلال تامین کننده برای قطعات یدکی بحرانی بر پایه مدل فرآیند زنجیره مارکوف طراحی شد و برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

رحمتی و رمضانی [5] به چارچوب ارزیابی سیستم مدیریت انبار قطعات یدکی و ارائه نقشه راه پرداخته اند. ابعاد و شاخص های چارچوب پیشنهادی از طریق مطالعه مدل های ارزیابی عملکرد و ادبیات پیشین و جلسات خبرگی به دست آمده است که شامل ۹ بعد و هر یک از ابعاد دارای ۱۰ شاخص و هریک از شاخص ها به چهار سطح، ۱ (سطح آگاهی)، ۲ (سطح تعریف)، ۳ (سطح مدیریت و اجرا) و ۴ (سطح تعالی) تقسیم می شوند.

حسین زاده و رمضانی [2] به ارائه چارچوب مدیریت یکپارچه زنجیره تامین قطعات یدکی ^۱MRO-iREAM پرداخته اند. در این تحقیق ابتدا چارچوب های مدیریت قطعات یدکی مورد بررسی قرار گرفتند و سپس با استفاده از رویکرد گراند تئوری با ۱۲ نفر از خبرگان، مصاحبه شد. داده های پژوهش به کمک روش کدگذاری باز، محوری و انتخابی که از اجزای روش گراند تئوری است مورد تحلیل قرار گرفتند.

جایارمان و همکاران [6] یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط در مساله طراحی شبکه زنجیره تامین، تحت یک سیستم سفارش کشتی، بر اساس تقاضای مشتریان برای محصولات بازیابی شده، ارائه نموده اند. هدف از مدل ارائه شده، به حداقل رساندن هزینه کل است. در این مدل فرآیند تولید مجدد محصولات مرجوعی مورد بررسی قرار گرفته است.

کومار و کریگ [7] زنجیره تامین حلقه بسته شرکت Dell را مورد مطالعه قرار داده اند. آن ها همچنین تجزیه و تحلیل نقاط قوت، ضعف، فرصت ها و تهدیدات^۲ شرکت دل را بررسی کرده اند.

کاوالبیری و همکاران [8] یک چارچوب تصمیم گیری برای مدیریت قطعات یدکی تعمیر و نگهداری ارائه داده اند. این چارچوب از پنج مرحله متوالی تشکیل شده است: ۱- کدگذاری بخش، ۲- طبقه بندی بخش، ۳- پیش بینی تقاضای بخشی، ۴- سیاست مدیریت سهام و ۵- آزمون سیاست و اعتبار.

گارسیا بنیتو و مارتین پنیلا [9] به مدلسازی توزیع مجدد قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی پرداخته اند. در حوزه هایی مثل نظامی-دفاعی، دو جنبه متمایز وجود دارد: ۱- زمان حمل و نقل بین انبارهای فرعی بیشتر از زمان حمل بین انبار اصلی و یک انبار فرعی معین است و ۲- هزینه حمل و نقل ثابت است. این مطالعه موردی در ارتش اسپانیا صورت گرفته است و مدل پیشنهادی یک تحقیق نوآورانه بود.

کانتینی و همکاران [10] به پیکربندی زنجیره تامین قطعات یدکی پرداخته اند. یک زنجیره تامین قطعات یدکی با پیکربندی مناسب می تواند هزینه ها را کاهش داده و رقابت خرده فروشان قطعات یدکی را افزایش دهد. هدف این مقاله کمک به مدیران و دست اندرکاران در تعیین نحوه طراحی زنجیره تامین قطعات یدکی خود است، بنابراین هم پیکربندی زنجیره تامین قطعات یدکی و هم فناوری ساخت را برای اتخاذ از طریق توسعه یک سیستم پشتیبانی تصمیم تعریف می کند.

در ادامه دسته بندی و خلاصه ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون موضوع تحقیق در جدول ۱ ارائه می گردد.

^۱ Maintenance, Repair and Operation- Iranian Reliability Engineering and Asset Management (MRO-iREAM)

^۲ Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats (SWOT)

جدول ۱- دسته بندی و خلاصه ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون موضوع.
Table 1 - Classification and summary of research conducted on the topic.

جنبه تحقیق و مدل سازی											
روش حل	تعداد اهداف				مدلسازی ریاضی			تحقیق توصیفی	نویسندگان	سال	ردیف
	مطالعه موردی	چندهدفه	تک هدفه	برنامه ریزی فازی	برنامه ریزی استوار / احتمالی	قطعی					
✓	غیر فرا ابتکاری	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	بشیری و شرافتی [11]	1395	1
✓	و دقیق	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	دهنا و باقری [12]	1395	2
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	جهرمی و همکاران [13]	1396	3
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	سعیدی سوق و همکاران [3]	1397	4
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	صفار و همکاران [14]	1397	5
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	عامری و همکاران [1]	1398	6
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	رضانی ورحمتی [5]	1401	7
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	حسین زاده و رضانی [2]	1402	8
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	دمیرل و همکاران [15]	2014	9
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	گوویندان و همکاران [16]	2015	10
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	جایارمان و همکاران [6]	2015	11
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	یی و همکاران [17]	2016	12
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کومار و کریگ [7]	2017	13
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کاوالیری و همکاران [8]	2020	14
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	گارسیا بنیتو و مارتین پنیا [9]	2021	15
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کانتینی و همکاران [10]	2024	16
✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	تحقیق حاضر	1404	17

۳- روش شناسی پژوهش

از آن جا که تحقیق حاضر یکی از مباحث مهم و ضروری در حوزه زنجیره تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی می باشد، از نوع تحقیقات کاربردی است. اطلاعات مورد نیاز این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه های (بررسی کتاب ها و اسناد و پایان نامه ها و مقالات موجود) و نظرات کارشناسان امر و کسانی که در حوزه نگهداری و تعمیرات به طور مستقیم با قطعات یدکی در ارتباط هستند، به دست آمد و با قرار دادن مدلی و همکاران [18] و مدل پیشوایی و ترابی [19] به عنوان مبنای کار، طراحی مدل تحقیق جاری انجام شد. در این پژوهش از نرم افزار ایمز و از *NSGA-II* و شبیه سازی تبرید چند هدفه^۱ برای حل مساله تامین قطعات یدکی استفاده شده است.

فرض های مدل

۱. مشتریان محصولات نو و دست دوم، یکسان می باشند.
۲. فضای حل مساله به صورت گسسته است.
۳. مقادیر کالاهای مرجوعی و تقاضای مشتریان غیر قطعی و فازی است.
۴. ظرفیت تسهیلات محدود است.
۵. مکان تامین کنندگان و مشتریان ثابت است و مکان تولید، مونتاژ، توزیع، جمع آوری، تعمیر، بازیافت و دفن و انهدام ثابت نیست. محصولات دست دوم کیفیت پایین تری نسبت به محصولات نو دارند.
۶. به تمامی مشتریان پاسخ داده می شود و تمام کالاهای مرجوعی جمع آوری می شوند.
۷. محصولات وارد شده در مراکز در هر دوره زمانی، در همان دوره از مرکز مربوطه خارج می شوند و وارد دوره بعدی نمی شوند.

مجموعه ها

$i \in I$: نقاط ثابت برای مراکز تامین کنندگان.

$j \in J$: نقاط بالقوه برای مراکز تولید کنندگان.

$b \in B$: نقاط بالقوه برای مراکز مونتاژ.

$k \in K$: نقاط بالقوه برای مراکز توزیع.

$l \in L$: نقاط ثابت برای مراکز مشتریان.

$m \in M$: نقاط بالقوه برای مراکز جمع آوری.

$r \in R$: نقاط بالقوه برای مراکز تعمیر.

$p \in P$: نقاط بالقوه برای مراکز بازیافت.

$n \in N$: نقاط بالقوه برای مراکز دفن و انهدام.

$c \in C$: مجموعه قطعات به کار رفته در محصول.

¹ Multi-Objective Simulated Annealing (MOSA)

پارامترها

جدول ۲- معرفی پارامترهای مدل.

Table 2- Introduction of model parameters.

اندیس	اندیس	اندیس	
$\bar{Q}_{lt}$	تقاضای محصول از مشتری l در دوره t	$\bar{C}AP_{ci}$	ظرفیت مرکز تامین i برای هر جز c
Em	نرخ برگشتی محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m	$\bar{C}AP_{cj}$	ظرفیت مرکز تولید j برای هر جز c
Tp	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز باز یافت p	$\bar{C}AP_{jj}$	ظرفیت ساخت مجدد محصولات رسیده از مرکز باز یافت p در مرکز تولید j برای هر جز c
Rb	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز مونتاژ b	$\bar{C}AP_{cb}$	ظرفیت مرکز مونتاژ b برای هر جز c
An	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز دفن و انهدام n	$\bar{C}AP_{bb}$	ظرفیت مونتاژ دوباره محصولات رسیده از مرکز تعمیر در مرکز مونتاژ b برای هر جز c
Zk	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز توزیع k	$\bar{C}AP_{kk}$	ظرفیت مرکز توزیع k
$\bar{F}J_{jt}$	هزینه اجاره مرکز توزیع j در دوره t	$\bar{C}AP_{KK}$	ظرفیت محصولات مرجوعی رسیده از مرکز تعمیر در مرکز توزیع k
$\bar{F}B_{bt}$	هزینه اجاره مرکز مونتاژ b در دوره t	$\bar{C}AP_{mm}$	ظرفیت مرکز جمع‌آوری m
$\bar{F}K_{kt}$	هزینه اجاره مرکز توزیع k در دوره t	$\bar{C}AP_{rr}$	ظرفیت مرکز تعمیر r
$\bar{F}M_{mt}$	هزینه اجاره مرکز جمع‌آوری m در دوره t	$\bar{C}AP_{nn}$	ظرفیت مرکز دفن و انهدام n برای هر جز c
$\bar{F}R_{rt}$	هزینه اجاره مرکز تعمیر r در دوره t	$\bar{C}AP_{pp}$	ظرفیت مرکز باز یافت p برای هر جز c
$\bar{F}P_{pt}$	هزینه اجاره مرکز باز یافت p در دوره t	$\bar{T}I_{cijt}$	زمان تحویل قابل قبول هر جز c از مرکز تامین i به مرکز تولید j در دوره t
$\bar{F}N_{nt}$	هزینه اجاره مرکز دفن و انهدام n در دوره t	$\bar{T}J_{cbt}$	زمان تحویل قابل قبول هر جز c از مرکز تولید j به مرکز مونتاژ b در دوره t
$\bar{C}I_{cijt}$	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تامین i به مرکز تولید j در دوره t	$\bar{T}B_{bkt}$	زمان تحویل قابل قبول هر محصول از مرکز مونتاژ b به مرکز توزیع k در دوره t
$\bar{C}J_{cbt}$	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تولید j به مرکز مونتاژ b در دوره t	$\bar{T}K_{klt}$	زمان تحویل قابل قبول هر محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l در دوره t
$\bar{C}B_{bkt}$	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز مونتاژ b به مرکز توزیع k در دوره t	$\bar{T}L_{lmt}$	زمان تحویل قابل قبول هر محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m در دوره t
$\bar{C}K_{klt}$	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l در دوره t	$\bar{T}M_{mrt}$	زمان تحویل قابل قبول هر محصول از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تعمیر r در دوره t
$\bar{C}L_{lmt}$	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m در دوره t	$\bar{T}R_{crpt}$	زمان تحویل قابل قبول هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز باز یافت p در دوره t
$\bar{C}M_{mrt}$	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تعمیر r در دوره t	$\bar{T}R_{crnt}$	زمان تحویل قابل قبول هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز دفن و انهدام n در دوره t
$\bar{C}R_{crpt}$	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز باز یافت p در دوره t	$\bar{T}R_{crbt}$	زمان تحویل قابل قبول هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز مونتاژ b در دوره t
$\bar{C}R_{nrt}$	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز دفن و انهدام n در دوره t	$\bar{T}R_{rkt}$	زمان تحویل قابل قبول هر محصول از مرکز تعمیر r به مرکز توزیع k در دوره t
$\bar{C}R_{crbt}$	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز مونتاژ b در دوره t	$\bar{T}P_{cpjt}$	زمان تحویل قابل قبول هر جز c از مرکز باز یافت p به مرکز تولید j در دوره t
$\bar{C}R_{rkt}$	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز تعمیر r به مرکز توزیع k در دوره t	r_c	تعداد قطعات نوع c
$\bar{C}P_{cpjt}$	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز باز یافت p به مرکز تولید j در دوره t		

جدول ۳- معرفی متغیرهای مدل.
Table 2- Introduction of model variables.

متغیر	متغیر	متغیر
$YJ_{jt} = 1$	اگر مرکز تولید j در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XBK_{bkt} مقدار جریان هر محصول از مرکز مونتاژ b به مرکز توزیع k در دوره t
$YB_{bt} = 1$	اگر مرکز مونتاژ b در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XKL_{klt} مقدار جریان هر محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l در دوره t
$YK_{kt} = 1$	اگر مرکز توزیع k در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XLM_{lmt} مقدار جریان هر محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m در دوره t
$YM_{mt} = 1$	اگر مرکز جمع‌آوری m در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XMR_{mrt} مقدار جریان هر محصول از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تعمیر r در دوره t
$YR_{rt} = 1$	اگر مرکز تعمیر r در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XRP_{crpt} به مرکز باز یافت r از مرکز تعمیر c مقدار جریان هر جز p در دوره t
$YP_{pt} = 1$	اگر مرکز باز یافت p در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XRN_{crnt} به مرکز دفن و r از مرکز تعمیر c مقدار جریان هر جز n در دوره t
$YN_{nt} = 1$	اگر مرکز دفن و انهدام n در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XRB_{crbt} به مرکز مونتاژ r از مرکز تعمیر c مقدار جریان هر جز b در دوره t
XIJ_{cijt}	مقدار جریان هر جز c از مرکز تامین i به مرکز تولید j در دوره t	XRK_{rkt} به مرکز توزیع r مقدار جریان هر محصول از مرکز تعمیر k در دوره t
$XJB_{cjb t}$	مقدار جریان هر جز c از مرکز تولید j به مرکز مونتاژ b در دوره t	XPJ_{cpjt} به مرکز تولید p از مرکز باز یافت c مقدار جریان هر جز t در دوره t

۳-۱- مدل ریاضی مساله

با استفاده از نمادهای فوق می‌توان مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین ارایه کرد که با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداقل‌سازی زمان به‌صورت زیر ارایه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \min f1 = & \sum_j \sum_t \bar{F}J_{jt} YJ_{jt} + \sum_b \sum_t \bar{F}B_{bt} YB_{bt} + \sum_k \sum_t \bar{F}K_{kt} YK_{kt} + \sum_m \sum_t \bar{F}M_{mt} YM_{mt} \\
 & + \sum_r \sum_t \bar{F}R_{rt} YR_{rt} + \sum_p \sum_t \bar{F}P_{pt} YP_{pt} + \sum_n \sum_t \bar{F}N_{nt} YN_{nt} + \\
 & \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t (\bar{C}J_{cjb t} \cdot XJB_{cjb t}) + \sum_c \sum_i \sum_j \sum_t (\bar{C}I_{cijt} \cdot XIJ_{cijt}) + \\
 & \sum_b \sum_k \sum_t (\bar{C}B_{bkt} \cdot XBK_{bkt}) + \sum_k \sum_l \sum_t (\bar{C}L_{klt} \cdot XKL_{klt}) + \\
 & \sum_l \sum_m \sum_t (\bar{C}L_{lmt} \cdot XLM_{lmt}) + \sum_m \sum_r \sum_t (\bar{C}R_{mrt} \cdot XMR_{mrt}) + \\
 & \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t (\bar{C}P_{crpt} \cdot XRP_{crpt}) + \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t (\bar{C}J_{cpjt} \cdot XPJ_{cpjt}) + \\
 & \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t (\bar{C}B_{crbt} \cdot XRB_{crbt}) + \sum_r \sum_k \sum_t (\bar{C}R_{rkt} \cdot XRK_{rkt}) + \\
 & \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t (\bar{C}N_{crnt} \cdot XRN_{crnt}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
\min f2 = & \sum_r \sum_i \sum_j \sum_t \widetilde{T}I_{cijt} \cdot XIJ_{cijt} + \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t \widetilde{T}JB_{cjb t} \cdot XJB_{cjb t} + \\
& \sum_b \sum_k \sum_t \widetilde{T}BK_{bkt} \cdot XBK_{bkt} + \sum_k \sum_l \sum_t \widetilde{T}KL_{klt} \cdot XKL_{klt} + \sum_l \sum_m \sum_t \widetilde{T}LM_{lmt} \cdot XLM_{lmt} \\
& \sum_m \sum_r \sum_t \widetilde{T}MR_{mrt} \cdot XMR_{mrt} + \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t \widetilde{T}RP_{crpt} \cdot XRP_{crpt} + \\
& \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t \widetilde{T}PJ_{cpjt} \cdot XPJ_{cpjt} + \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t \widetilde{T}RB_{crbt} \cdot XRB_{crbt} + \\
& \sum_r \sum_k \sum_t \widetilde{T}RK_{rkt} \cdot XRK_{rkt} + \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t \widetilde{T}RN_{crnt} \cdot XRN_{crnt}.
\end{aligned} \tag{۲}$$

s. t.

$$\sum_k XKL_{klt} \geq \widetilde{Q}_{lt}, \text{ for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \tag{۳}$$

$$\sum_m XLM_{lmt} \geq Em \cdot \widetilde{Q}_{lt}, \text{ for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \tag{۴}$$

$$\sum_r XMR_{mrt} = \sum_l XLM_{lmt}, \text{ for all } m \in M, \text{ for all } t \in T. \tag{۵}$$

$$\sum_k XRK_{rkt} = ZK \sum_m XMR_{mrt}, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \tag{۶}$$

$$\sum_b XRB_{crbt} = r_c * Rb \sum_m XMR_{mrt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \tag{۷}$$

$$\sum_p XRP_{crpt} = r_c * Tp \sum_m XMR_{mrt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \tag{۸}$$

$$\sum_n XRN_{crnt} = r_c * An \sum_m XMR_{mrt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \tag{۹}$$

$$\sum_j XPJ_{cpjt} = \sum_r XRP_{crpt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۰}$$

$$\sum_i XIJ_{cijt} + \sum_p XPJ_{cpjt} = \sum_b XJB_{cjb t}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۱}$$

$$\sum_j XJB_{cjb t} + \sum_r XRB_{crbt} = r_c * \sum_k XBK_{bkt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۲}$$

$$\sum_b XBK_{bkt} + \sum_r XRK_{rkt} = \sum_l XKL_{klt}, \text{ for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۳}$$

$$\sum_j XIJ_{cijt} \leq \widetilde{CAPI}_{ci}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } i \in I, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۴}$$

$$\sum_i XIJ_{cijt} \leq \widetilde{CAPJ}_{cj} YJ_{jt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۵}$$

$$\sum_j XJB_{cjb t} \leq \widetilde{CAPB}_{cb} YB_{bt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۶}$$

$$\sum_b XBK_{bkt} \leq \widetilde{CAPK}_k YK_{kt}, \text{ for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۷}$$

$$\sum_l XLM_{lmt} \leq \widetilde{CAPM}_m YM_{mt}, \text{ for all } m \in M, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۸}$$

$$\sum_m XMR_{mrt} \leq \widetilde{CAPR}_r YR_{rt}, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \tag{۱۹}$$

$$\sum_r XRP_{crpt} \leq \widetilde{CAPP}_{cp} YP_{pt}, \text{ for all } c \in C, \text{ for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \tag{۲۰}$$

$$\sum_r XRN_{crnt} \leq \widehat{CAPN}_{cn} YN_{nt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{for all } n \in N, \text{for all } t \in T. \quad (21)$$

$$\sum_p XPJ_{cpjt} \leq \widehat{CAPJ}_{cj} YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{for all } j \in J, \quad \text{for all } t \in T. \quad (22)$$

$$\sum_r XRB_{crbt} \leq \widehat{CAPB}_{cb} YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{for all } b \in B, \quad \text{for all } t \in T. \quad (23)$$

$$\sum_r XRK_{rkt} \leq \widehat{CAPK}_{k} YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \quad \text{for all } t \in T. \quad (24)$$

$$\sum_j YJ_{jt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (25)$$

$$\sum_b YB_{bt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (26)$$

$$\sum_k YK_{kt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (27)$$

$$\sum_m YM_{mt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (28)$$

$$\sum_r YR_{rt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (29)$$

$$\sum_p YP_{pt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (30)$$

$$\sum_n YN_{nt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (31)$$

$$Rb + ZK + Tp + An = 1. \quad (32)$$

تابع هدف (۱) نشان‌دهنده حداقل‌سازی هزینه‌های جابه‌جایی و حمل و نقل محصولات و هزینه اجاره مراکز در هر دوره می‌باشد. **تابع هدف (۲)** سعی در کمیته‌سازی زمان‌های حمل و نقل بین مراکز در هر دوره دارد. **محدودیت (۳)** تضمین می‌کند که در جریان مستقیم تقاضای مشتریان پاسخ داده شود. **محدودیت (۴)** تضمین می‌کند که در جریان برگشتی تمام محصولات (یک نوع محصول) مرجوعی جمع‌آوری شده و به محل جمع‌آوری منتقل شود. **محدودیت (۵)** تضمین می‌کند محصولات وارد شده به محل جمع‌آوری برابر محصولات خارج شده از آن می‌باشند. **محدودیت (۶)** تا **محدودیت (۹)** تضمین می‌کنند محصولات وارد شده به محل تعمیر برابر محصولات خارج شده از آن می‌باشند. **محدودیت (۱۰)** تضمین می‌کند قطعات وارد شده به مرکز باز یافت برابر قطعات خارج شده از آن می‌باشند. **محدودیت (۱۱)** تضمین می‌کند قطعات وارد شده به مرکز تولید برابر قطعات خارج شده از آن می‌باشند. **محدودیت (۱۲)** تضمین می‌کند قطعات وارد شده به محل مونتاژ برابر قطعات خارج شده از آن می‌باشند. **محدودیت (۱۳)** تضمین می‌کند محصولات وارد شده به محل توزیع برابر محصولات خارج شده از آن می‌باشند. **محدودیت (۱۴)** تا **محدودیت (۲۴)** تضمین می‌کنند که جریان تنها بین نقاطی در جریان باشد که در آن تسهیلی اجاره شده باشد و به ترتیب مربوط به محدودیت‌های ظرفیت مراکز تامین‌کننده، تولیدکننده، مونتاژ، توزیع‌کننده، جمع‌آوری، تعمیر، باز یافت، دفن و انهدام، ظرفیت قطعات مرجوعی رسیده از مرکز باز یافت در مراکز تولید، ظرفیت قطعات مرجوعی رسیده از مرکز تعمیر در مراکز مونتاژ و همچنین ظرفیت محصولات مرجوعی رسیده از مرکز تعمیر در مراکز توزیع می‌باشند. **محدودیت (۲۵)** تا **محدودیت (۳۱)** تضمین می‌کنند که حداقل یکی از مراکز تولید، مونتاژ، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، باز یافت و دفن و انهدام اجاره شود. **محدودیت (۳۲)** تضمین می‌کند مجموع ضرایب محصولات و قطعات خارج شده از مرکز تعمیر برابر ۱ باشد.

۳-۲- تبدیل مدل فازی به قطعی

روش‌های متعددی برای تبدیل مدل با پارامترهای غیرقطعی به مدل با پارامترهای قطعی وجود دارد که در این تحقیق از روش خیمنز و همکاران [20] به دلیل کارایی مناسب آن در مسایل خطی فازی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. تمام پارامترهای فازی مدل ریاضی توسط رابطه (۳۳) به پارامتر قطعی تبدیل می‌شوند:

$$M_c(x) = \begin{cases} \frac{x - c^p}{c^m - c^p}, & \text{if } c^p \leq x \leq c^m, \\ 1, & \text{if } c^m \leq x \leq c^n, \\ \frac{c^o - x}{c^o - c^n}, & \text{if } c^n \leq x \leq c^o, \\ 0, & \text{if } x \leq c^p \text{ or } x \geq c^o. \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \min f1 = & \sum_j \sum_t \left(\frac{FJ_{jt}^1 + FJ_{jt}^2 + FJ_{jt}^3 + FJ_{jt}^4}{4} \right) YJ_{jt} + \sum_b \sum_t \left(\frac{FB_{bt}^1 + FB_{bt}^2 + FB_{bt}^3 + FB_{bt}^4}{4} \right) YB_{bt} + \\ & \sum_k \sum_t \left(\frac{FK_{kt}^1 + FK_{kt}^2 + FK_{kt}^3 + FK_{kt}^4}{4} \right) YK_{kt} + \sum_m \sum_t \left(\frac{FM_{mt}^1 + FM_{mt}^2 + FM_{mt}^3 + FM_{mt}^4}{4} \right) YM_{mt} + \\ & \sum_r \sum_t \left(\frac{FR_{rt}^1 + FR_{rt}^2 + FR_{rt}^3 + FR_{rt}^4}{4} \right) YR_{rt} + \sum_p \sum_t \left(\frac{FP_{pt}^1 + FP_{pt}^2 + FP_{pt}^3 + FP_{pt}^4}{4} \right) YP_{pt} + \\ & \sum_n \sum_t \left(\frac{FN_{nt}^1 + FN_{nt}^2 + FN_{nt}^3 + FN_{nt}^4}{4} \right) YN_{nt} + \sum_c \sum_i \sum_j \sum_t \left(\frac{CIJ_{cijt}^1 + CIJ_{cijt}^2 + CIJ_{cijt}^3 + CIJ_{cijt}^4}{4} \right) .XIJ_{cijt} + \\ & \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t \left(\frac{CJB_{cjb t}^1 + CJB_{cjb t}^2 + CJB_{cjb t}^3 + CJB_{cjb t}^4}{4} \right) .XJB_{cjb t} + \sum_b \sum_k \sum_t \left(\frac{CBK_{bkt}^1 + CBK_{bkt}^2 + CBK_{bkt}^3 + CBK_{bkt}^4}{4} \right) .XBK_{bkt} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_t \left(\frac{CKL_{klt}^1 + CKL_{klt}^2 + CKL_{klt}^3 + CKL_{klt}^4}{4} \right) .XKL_{klt} + \\ & \sum_l \sum_m \sum_t \left(\frac{CLM_{lmt}^1 + CLM_{lmt}^2 + CLM_{lmt}^3 + CLM_{lmt}^4}{4} \right) .XLM_{lmt} + \\ & \sum_m \sum_r \sum_t \left(\frac{CMR_{mrt}^1 + CMR_{mrt}^2 + CMR_{mrt}^3 + CMR_{mrt}^4}{4} \right) .XMR_{mrt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t \left(\frac{CRP_{crpt}^1 + CRP_{crpt}^2 + CRP_{crpt}^3 + CRP_{crpt}^4}{4} \right) .XRP_{crpt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t \left(\frac{CRN_{crnt}^1 + CRN_{crnt}^2 + CRN_{crnt}^3 + CRN_{crnt}^4}{4} \right) .XRN_{crnt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t \left(\frac{CRB_{crbt}^1 + CRB_{crbt}^2 + CRB_{crbt}^3 + CRB_{crbt}^4}{4} \right) .XRB_{crbt} + \\ & \sum_r \sum_k \sum_t \left(\frac{CRK_{rkt}^1 + CRK_{rkt}^2 + CRK_{rkt}^3 + CRK_{rkt}^4}{4} \right) .XRK_{rkt} + \\ & \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t \left(\frac{CPJ_{cpjt}^1 + CPJ_{cpjt}^2 + CPJ_{cpjt}^3 + CPJ_{cpjt}^4}{4} \right) .XPJ_{cpjt}. \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \min f2 = & \sum_c \sum_i \sum_j \sum_t \left(\frac{TIJ_{cijt}^1 + TIJ_{cijt}^2 + TIJ_{cijt}^3 + TIJ_{cijt}^4}{4} \right) .XIJ_{cijt} \\ & + \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t \left(\frac{TJB_{cjb t}^1 + TJB_{cjb t}^2 + TJB_{cjb t}^3 + TJB_{cjb t}^4}{4} \right) .XJB_{cjb t} + \\ & \sum_b \sum_k \sum_t \left(\frac{TBK_{bkt}^1 + TBK_{bkt}^2 + TBK_{bkt}^3 + TBK_{bkt}^4}{4} \right) .XBK_{bkt} + \sum_k \sum_l \sum_t \left(\frac{TKL_{klt}^1 + TKL_{klt}^2 + TKL_{klt}^3 + TKL_{klt}^4}{4} \right) .XKL_{klt} + \\ & \sum_l \sum_m \sum_t \left(\frac{TLM_{lmt}^1 + TLM_{lmt}^2 + TLM_{lmt}^3 + TLM_{lmt}^4}{4} \right) .XLM_{lmt} \\ & + \sum_m \sum_r \sum_t \left(\frac{TMR_{mrt}^1 + TMR_{mrt}^2 + TMR_{mrt}^3 + TMR_{mrt}^4}{4} \right) .XMR_{mrt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t \left(\frac{TRP_{crpt}^1 + TRP_{crpt}^2 + TRP_{crpt}^3 + TRP_{crpt}^4}{4} \right) .XRP_{crpt} \\ & + \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t \left(\frac{TRN_{crnt}^1 + TRN_{crnt}^2 + TRN_{crnt}^3 + TRN_{crnt}^4}{4} \right) .XRN_{crnt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t \left(\frac{TRB_{crbt}^1 + TRB_{crbt}^2 + TRB_{crbt}^3 + TRB_{crbt}^4}{4} \right) .XRB_{crbt} + \\ & \sum_r \sum_k \sum_t \left(\frac{TRK_{rkt}^1 + TRK_{rkt}^2 + TRK_{rkt}^3 + TRK_{rkt}^4}{4} \right) .XRK_{rkt} + \\ & \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t \left(\frac{TPJ_{cpjt}^1 + TPJ_{cpjt}^2 + TPJ_{cpjt}^3 + TPJ_{cpjt}^4}{4} \right) .Xcpjt. \end{aligned} \quad (35)$$

$$\sum_k XKL_{klt} \geq \alpha \frac{Q_{lt}^3 + Q_{lt}^4}{2} + (1 - \alpha) \frac{Q_{lt}^1 + Q_{lt}^2}{2}, \quad \text{for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \quad (36)$$

$$\sum_m XLM_{lmt} \geq Em. \left(\alpha \frac{Q_{lt}^3 + Q_{lt}^4}{2} + (1 - \alpha) \frac{Q_{lt}^1 + Q_{lt}^2}{2} \right), \quad \text{for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \quad (37)$$

$$\sum_r XMR_{mrt} = \sum_l XLM_{lmt}, \quad \text{for all } m \in M, \text{ for all } t \in T, \quad (38)$$

$$\sum_k XRK_{rkt} = ZK \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (39)$$

$$\sum_b XRB_{crbt} = r_c * Rj \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (40)$$

$$\sum_p XRP_{crpt} = r_c * Tp \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (41)$$

$$\sum_n XRN_{crnt} = r_c * An \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (42)$$

$$\sum_j XPJ_{cpjt} = \sum_r XRP_{crpt}, \quad \text{for all } c \in C, \quad \text{for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \quad (43)$$

$$\sum_i XIJ_{cijt} + \sum_p XPJ_{cpjt} = \sum_b XJB_{cbjt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \quad (44)$$

$$\sum_j XJB_{cbjt} + \sum_r XRB_{crbt} = r_c * \sum_k XBK_{bkt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \quad (45)$$

$$\sum_b XBK_{bkt} + \sum_r XRK_{rkt} = \sum_l XKL_{klt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (46)$$

$$\sum_j XIJ_{cijt} \leq \left[\alpha \frac{CAPI_{ci}^1 + CAPI_{ci}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPI_{ci}^3 + CAPI_{ci}^4}{2} \right], \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } i \in I, \quad \text{for all } t \in T. \quad (47)$$

$$\sum_i XIJ_{cijt} \leq \left[\alpha \frac{CAPJ_{cj}^1 + CAPJ_{cj}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPJ_{cj}^3 + CAPJ_{cj}^4}{2} \right] . YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \quad \text{for all } t \in T. \quad (48)$$

$$\sum_k XJB_{cbjt} \leq \left[\alpha \frac{CAPB_{cb}^1 + CAPB_{cb}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPB_{cb}^3 + CAPB_{cb}^4}{2} \right] . YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \quad (49)$$

$$\sum_b XBK_{bkt} \leq \left[\alpha \frac{CAPK_{k+}^1 + CAPK_{k+}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPK_{k+}^3 + CAPK_{k+}^4}{2} \right] . YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (50)$$

$$\sum_l XLM_{lmt} \leq \left[\alpha \frac{CAPM_m^1 + CAPM_m^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPM_m^3 + CAPM_m^4}{2} \right] . YM_{mt}, \quad \text{for all } m \in M, \text{ for all } t \in T. \quad (51)$$

$$\sum_m XMR_{mrt} \leq \left[\alpha \frac{CAPR_r^1 + CAPR_r^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPR_r^3 + CAPR_r^4}{2} \right] . YR_{rt}, \quad \text{for all } r \in R, \quad \text{for all } t \in T. \quad (52)$$

$$\sum_r XRP_{crpt} \leq \left[\alpha \frac{CAPP_{cp}^1 + CAPP_{cp}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPP_{cp}^3 + CAPP_{cp}^4}{2} \right] . YP_{pt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \quad (53)$$

$$\sum_r XRN_{crnt} \leq \left[\alpha \frac{CAPN_{cn}^1 + CAPN_{cn}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPN_{cn}^3 + CAPN_{cn}^4}{2} \right] . YN_{nt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } n \in N, \text{ for all } t \in T. \quad (54)$$

$$\sum_p XPJ_{cpt} \leq \left[\alpha \frac{CAPJJ_{cj}^1 + CAPJJ_{cj}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPJJ_{cj}^3 + CAPJJ_{cj}^4}{2} \right] . YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \quad (55)$$

$$\sum_r XRB_{crt} \leq \left[\alpha \frac{CAPBB_{cb}^1 + CAPBB_{cb}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPBB_{cb}^3 + CAPBB_{cb}^4}{2} \right] . YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C \text{ for all } b \in B \text{ for all } t \in T. \quad (56)$$

$$\sum_r XRK_{rkt} \leq \left[\alpha \frac{CAPKK_k^1 + CAPKK_k^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPKK_k^3 + CAPKK_k^4}{2} \right] . YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (57)$$

$$\sum_j YJ_{jt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (58)$$

$$\sum_b YB_{bt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (59)$$

$$\sum_k YK_{kt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (60)$$

$$\sum_m YM_{mt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (61)$$

$$\sum_r YR_{rt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (62)$$

$$\sum_p YP_{pt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (63)$$

$$\sum_n YN_{nt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (64)$$

$$Rj + ZK + Tp + An = 1. \quad (65)$$

۳-۳- الگوریتم ژنتیک چندهدفه

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم های اکتشافی حل مساله است که از مدل سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل های جدید از آمیزش نسل های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است. به عبارت دیگر این الگوریتم از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به منظور پیش بینی یا تطبیق الگو استفاده می کند. روش کار و الگوریتم کلی *NSGA-II* که یکی از حالت های چندهدفه الگوریتم ژنتیک می باشد، به شرح ذیل است [21]:

۱. ایجاد جمعیت اولیه
۲. محاسبه معیارهای برازندگی
۳. مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط های غلبه کردن
۴. محاسبه فاصله ازدحامی^۱
۵. انتخاب: به محض این که جمعیت اولیه بر اساس شرط های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می شود. این انتخاب بر اساس دو المان صورت می پذیرد: رتبه جمعیت و محاسبه فاصله
۶. انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید

¹ Crowding distance

۷. تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش
۸. جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل
۹. تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می شوند

پارامترهای کنترلی الگوریتم *NSGA-II* پیشنهادی، شامل تعداد تکرار الگوریتم، اندازه (سایز) جمعیت، درصد تقاطع، تعداد تقاطع، درصد جهش، تعداد جهش، نرخ جهش و شیوه انتخاب والد و جهش می باشد. مقادیر پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک چند هدفه در جدول ۴ نشان داده شده است. برای تنظیم پارامترهای کنترلی الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی و سعی و خطا، پارامترهای کنترلی الگوریتم مربوطه به دست آمده است.

جدول ۴- داده های مربوط به پارامترهای کنترلی الگوریتم *NSGA-II*.

Table 4- Data related to the control parameters of the *NSGA-II* algorithm.

موجودیت	پارامتر	مقدار داده یا روش تولید داده ها
کنترل برنامه	تعداد تکرار الگوریتم	50
	اندازه جمعیت	200
	درصد تقاطع	0.5
	تعداد تقاطع	$2 * \text{round} (p\text{Crossover} * n\text{Pop} / 2)$
	درصد جهش	0.3
	تعداد جهش	$\text{Round} (p\text{Mutation} * n\text{Pop})$
	روش انتخاب والد و جهش	تورنمنت دوتایی

۴- یافته ها

۴-۱- اعتبارسنجی الگوریتم فراابتکاری *NSGA-II* با روش دقیق

به منظور اثبات کارایی الگوریتم فراابتکاری، نتایج حل الگوریتم *NSGA-II* در حالت چند هدفه با نتایج حل به وسیله نرم افزار ایمز مقایسه می شوند. برای این منظور چند مساله نمونه طراحی شده و به ازای درجه α تا $\alpha=0.9$ ($\alpha=0.1$) به وسیله الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل گردیده است. با توجه به این که روش دقیق پیشنهادی، قادر به بهینه سازی هم زمان هر دو تابع هدف نمی باشد، لذا دو تابع هدف را از طریق هم فاز کردن، به یک تابع هدف تبدیل می نماییم و برای این کار از تابع *LP-Metric* مطابق رابطه (۶۶) بهره می گیریم.

$$\min z^* = \left[\sum_k \lambda_k \left(\frac{f_k - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^p + \sum_l \lambda_l \left(\frac{f_l^{\max} - f_l}{f_l^{\max} - f_l^{\min}} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (66)$$

ابعاد مسایل آزمایشی به کار رفته در مدل مربوطه در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از حل مسایل آزمایشی مورد نظر در جدول ۶ برای تابع هدف *F1* و *F2* در هر دوره نشان داده شده است. جدول ۷ متوسط درصد اختلاف نتایج حاصل از الگوریتم فراابتکاری را با نرم افزار ایمز نشان می دهد. جدول ۸ و شکل ۱ متوسط زمان اجرای هر یک از مسایل توسط نرم افزار ایمز و الگوریتم فراابتکاری را نشان می دهد.

جدول ۵- ابعاد مسایل آزمایشی.

Table 5- Dimensions of experimental problems.

شماره مسایل	تامین کننده	مرکز تولید	مرکز مونتاژ	مرکز توزیع	مشتریان	مرکز جمع آوری	مرکز تعمیر	مرکز باز یافت	مرکز دفن و انهدام
P ₁₁ -P ₁₉	5	6	7	7	29	6	7	5	4
P ₂₁ -P ₂₉	5	6	7	8	40	7	7	5	4
P ₃₁ -P ₃₉	7	8	9	10	60	9	9	7	4

جدول ۶- مقایسه الگوریتم فراابتکاری و حل دقیق ایمز در مساله آزمایشی.

Table 6 - Comparison of metaheuristic algorithm and exact solution of Aimms in the experimental problem.

NSGA-II	Aimms	NSGA-II	Aimms	درجه α	شماره مساله
F ₂	F ₂	F ₁	F ₁		
15653946	15653946	5591078	5590315	$\alpha=0.1$	P ₁₁
15933980	15933481	5683412	5682607	$\alpha=0.2$	P ₁₂
16213348	16213016	5775565	5774899	$\alpha=0.3$	P ₁₃
16503367	16492550	5867235	5867190	$\alpha=0.4$	P ₁₄
16772363	16772363	5960147	5959759	$\alpha=0.5$	P ₁₅
17054463	17053960	6173479	6164283	$\alpha=0.6$	P ₁₆
17351420	17337548	6332843	6332747	$\alpha=0.7$	P ₁₇
17634111	17621714	6430163	6430117	$\alpha=0.8$	P ₁₈
17913633	17906050	6527835	6527493	$\alpha=0.9$	P ₁₉
21634422	21629950	7769650	7769650	$\alpha=0.1$	P ₂₁
22027383	22022299	7903865	7903865	$\alpha=0.2$	P ₂₂
22414648	22414648	8047548	8038080	$\alpha=0.3$	P ₂₃
22813305	22806997	8172296	8172296	$\alpha=0.4$	P ₂₄
23199346	23199346	8315271	8306511	$\alpha=0.5$	P ₂₅
23599067	23591695	8440726	8440726	$\alpha=0.6$	P ₂₆
23992188	23984044	8574941	8574941	$\alpha=0.7$	P ₂₇
24385149	24376393	8709156	8709156	$\alpha=0.8$	P ₂₈
24778110	24768742	8843372	8843372	$\alpha=0.9$	P ₂₉
32460568	32458400	11369448	11363432	$\alpha=0.1$	P ₃₁
33045003	33040592	11558608	11558608	$\alpha=0.2$	P ₃₂
33627899	33622799	11794260	11793910	$\alpha=0.3$	P ₃₃
34205560	34205560	12010376	11989917	$\alpha=0.4$	P ₃₄
34792021	34791861	12314515	12300245	$\alpha=0.5$	P ₃₅
35380503	35379728	12686465	12665852	$\alpha=0.6$	P ₃₆
35980514	35968316	12870692	12870692	$\alpha=0.7$	P ₃₇
36571106	36556903	13075966	13074774	$\alpha=0.8$	P ₃₈
37169774	37145714	13283730	13278899	$\alpha=0.9$	P ₃₉

جدول ۷- متوسط درصد اختلاف نتایج حاصل از نرم افزار ایمز با الگوریتم فراابتکاری.

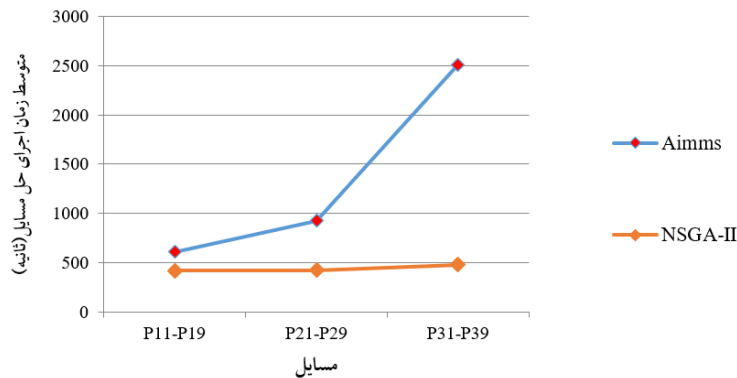
Table 7- Average percentage difference between the results obtained from the Aimms software and the meta-heuristic algorithm.

NSGA-II		
F ₂	F ₁	مسایل
0.0296	0.0226	P ₁₁ -P ₁₉
0.0233	0.0248	P ₂₁ -P ₂₉
0.0194	0.0612	P ₃₁ -P ₃₉

جدول ۸- متوسط زمان اجرای هر یک از مسایل توسط ایمز و الگوریتم فراابتکاری.

Table 8 - Average execution time of each problem by Aimms and metaheuristic algorithm.

NSGA-II	Aimms	مسایل
420	611	P ₁₁ -P ₁₉
423	924	P ₂₁ -P ₂₉
479	2510	P ₃₁ -P ₃₉



شکل ۱- متوسط زمان اجرای هر یک از مسائل توسط نرم افزار ایزم و الگوریتم فراابتکاری.

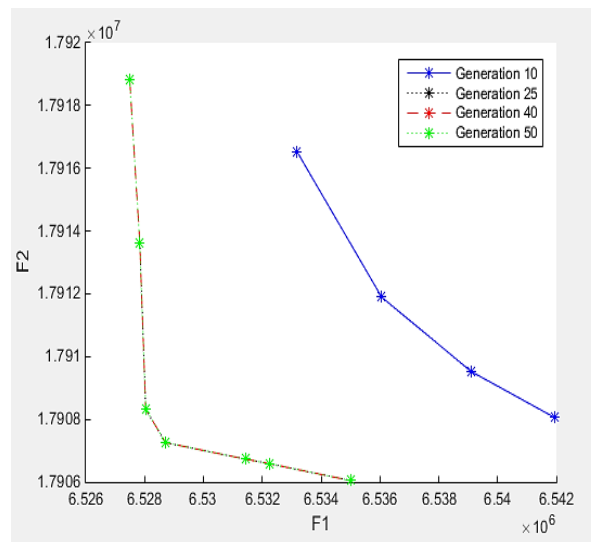
Figure 1- Average execution time of each problem by Aimms software and metaheuristic algorithm.

مطابق نتایج به دست آمده، مقادیر حاصل از حل دقیق در توابع، کمتر از مقادیر حاصل از الگوریتم فراابتکاری می باشد و نشان از بهینه سازی روش دقیق می دهد. همچنین با گسترش ابعاد مساله، مقادیر هزینه تابع هدف (۱) و تابع هدف (۲) افزایش می یابند و این حاکی از آن است که هزینه های بیشتری به زنجیره تامین حلقه بسته تحمیل می شود. با توجه به این که با افزایش درجه α ، فضای موجه کاهش می یابد، لذا مقادیر حاصل از هر دو تابع هدف برای روش پیشنهادی با افزایش α افزایش می یابد. متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم دقیق، نشان از نزدیک بودن جواب ها است و این که اختلاف جواب ها کمتر از ۱٪ می باشد و این نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم همگرا به جواب بهینه و کارا می باشد.

با توجه به جدول ۸ و شکل ۱ در می یابیم که زمان حل نرم افزار دقیق برای P_{31-P39} به یک باره افزایش یافته است و با حل حاصل از الگوریتم فراابتکاری اختلاف چشم گیری پیدا کرده است که نشان می دهد الگوریتم فراابتکاری در ابعاد بزرگ مسائل، در زمان کمتری به جواب بهینه می رسد.

۴-۲- نمایش برخی شاخص های مقایسه ای الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

سطحی از جبهه نامغلوب جواب نهایی برای مساله P_{19} (به ازای $\alpha=0.9$) برای نسل های ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ توسط الگوریتم NSGA-II در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- جبهه نامغلوب برای مساله P19 در الگوریتم NSGA-II.

Figure 2 - Undeclared front for problem P19 in the NSGA-II algorithm.

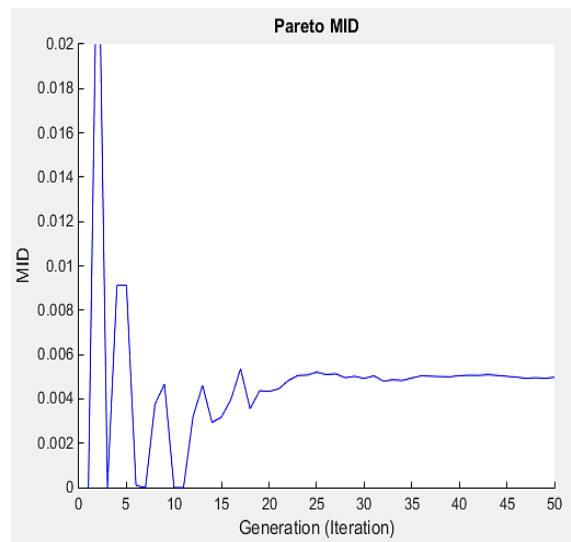
همچنین متوسط فاصله از نقطه ایده آل (MID) برای مساله P_{19} (به ازای $\alpha=0.9$) توسط الگوریتم فراابتکاری در شکل ۳ نمایش داده شده است.

برای محاسبه معیار MID از رابطه (۶۷) استفاده می شود.

$$MID = \frac{\sum C_i}{n} \quad (۶۷)$$

در رابطه (۶۷)، n تعداد جواب های پارتو موجود در مجموعه پارتو می باشد. مقدار C_i نیز از رابطه (۶۸) محاسبه می گردد که در واقع فاصله توابع هدف هر جواب تا مبدا مختصات می باشد.

$$C_i = \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \quad (۶۷)$$



شکل ۳- نمودار MID برای مساله P19 در الگوریتم NSGA-II.

Figure 3 - MID diagram for problem P19 in the NSGA-II algorithm.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط فازی برای زنجیره تامین قطعات یدکی یک سازمان دفاعی ارائه گردید که دارای دو هدف کمینه سازی هزینه و افزایش سطح پاسخ گویی بود. با توجه به محدودیت های زیاد مدل و چندهدفه بودن آن، استفاده از روش های کلاسیک بهینه سازی جهت دستیابی به جواب های بهینه سراسری یا موضعی، امری غیر ممکن بود. از طرفی این مساله از پیچیدگی زمان محاسباتی برخوردار بوده و به عبارتی در گروه مسایل *NP-Hard* دسته بندی می شود. بنابراین، در این تحقیق، از الگوریتم فراابتکاری چندهدفه *NSGA-II* استفاده شده است. نتایج الگوریتم *NSGA-II* با نتایج حل روش دقیق ایملز مقایسه شده است که نتایج نشان می دهد متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با روش دقیق، کمتر از ۱٪ می باشد. در ضمن زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش دقیق، به مراتب پایین تر است. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی، همگرا به جواب بهینه و کارا می باشد. از طرف دیگر کارایی الگوریتم *NSGA-II* بر اساس شاخص های مقایسه ای، به دست آمده است. در الگوریتم *NSGA-II* برای انتخاب جواب ها در مجموعه جبهه نامغلوب از دو مقوله رتبه بندی و فاصله ازدحامی استفاده شده است و جواب هایی که رتبه کمتر و فاصله ازدحامی بالاتری دارند، در مجموعه جبهه نامغلوب انتخاب می شوند. همچنین در الگوریتم *NSGA-II* پیشنهادی از عملگر تقاطع و جهش چند نقطه ای استفاده شده است که هر کدام با احتمال معین، برای ایجاد جمعیت جدید انتخاب می شوند. در پایان توصیه می شود از مدل پیشنهادی تحقیق حاضر، برای زنجیره تامین قطعات سازمان های مشابه استفاده شود. همچنین، انجام تحقیق مشابه برای تامین سایر اقلام (به غیر از قطعات یدکی)، به عنوان تحقیق آتی پیشنهاد می شود.

منابع

- [1] Ameri, E., Ebadi, S. T., & Teymouri, E. (2021). Presenting an inventory management model for critical spare parts considering supplier disruption conditions under uncertainty. *18th international conference on industrial engineering. (In Persian)*. Tehran, Iran, Civilica. <https://civilica.com/doc/1354248/>
- [2] Hosseinzadeh, M., & Ramezani, S. (2023). Provide integrated MRO-iREAM spare parts supply chain management framework. *Scientific journal of supply chain management*, 25(78), 71-88. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1402.25.78.6.8>

- [3] Saeedi Souq, Y., Ahmadi, A., & Ramezani, S. (2020). Joint optimization of spare parts and condition based maintenance using monte carlo approach. *Supply chain management*, 17(49), 36-53. **(In Persian)**.
https://scmj.ihu.ac.ir/article_203571.html?lang=en
- [4] Teymouri, E., & Ahmadi, M. (2019). *Supply chain management*. Iran University of Science and Technology Publications. **(In Persian)**. <https://b2n.ir/qu9753>
- [5] Rahmati, H., & Ramezani, S. (2021). Inventory management system and spare parts warehouse assessment framework and roadmap (MRO-iREAM). *Supply chain management*, 23(70), 71-90. **(In Persian)**.
https://scmj.ihu.ac.ir/article_206295.html?lang=en
- [6] Jayaraman, V., Guide Jr, V. D. R., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the operational research society*, 50(5), 497-508. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600716>
- [7] Kumar, S., & Craig, S. (2007). Dell, Inc.'s closed loop supply chain for computer assembly plants. *Information knowledge systems management*, 6(3), 197-214. <https://doi.org/10.3233/IKS-2007-00100>
- [8] Cavalieri, S., Garetti, M., Macchi, M., & Pinto, R. (2008). A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production planning & control*, 19(4), 379-396. <https://doi.org/10.1080/09537280802034471>
- [9] García-Benito, J. C., & Martín-Peña, M. L. (2021). A redistribution model with minimum backorders of spare parts: A proposal for the defence sector. *European journal of operational research*, 291(1), 178-193.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.014>
- [10] Cantini, A., Peron, M., De Carlo, F., & Sgarbossa, F. (2024). A decision support system for configuring spare parts supply chains considering different manufacturing technologies. *International journal of production research*, 62(8), 3023-3043.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2041757>
- [11] Bashiri, M., & Sherafti, M. (2013). Advanced Bi-objective closed loop supply chain network design considering correlated criteria in fuzzy environment. *Journal of industrial engineering research in production systems*, 1(1), 25-36. **(In Persian)**.
https://ier.basu.ac.ir/article_494.html?lang=en
- [12] Dehnad, H., & Bagheri, M. (2015). A review of the factors affecting the implementation of reverse logistics in the Iranian automotive industry. *International conference on modern research in industrial management and engineering*. **(In Persian)**. Tehran, Iran. Civilica. <https://civilica.com/doc/435358/>
- [13] Zareian Jahromi, H., Fallahnejad, M. S., Sadeghieh, A., & Ahmadi Yazdi, A. (2014). Robust multi-objective optimization model in sustainable closed-loop supply chain design. *Journal of industrial engineering research in production systems*, 2(3), 93-111. **(In Persian)**. https://journals.basu.ac.ir/article_816.html
- [14] Saffar, M. M., Shakuri Ganjavi, H., & Razmi, J. (2015). A green closed loop supply chain network design considering operational risks under uncertainty and solving the model with NSGA II algorithm. *Industrial engineering journal*, 49(1), 55-68. **(In Persian)**. <https://www.sid.ir/paper/166498/en>
- [15] Demirel, N., Özceylan, E., Paksoy, T., & Gökçen, H. (2014). A genetic algorithm approach for optimising a closed-loop supply chain network with crisp and fuzzy objectives. *International journal of production research*, 52(12), 3637-3664.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.879616>
- [16] Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European journal of operational research*, 240(3), 603-626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- [17] Ye, F., Zhao, X., Prahinski, C., & Li, Y. (2013). The impact of institutional pressures, top managers' posture and reverse logistics on performance—Evidence from China. *International journal of production economics*, 143(1), 132-143.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.12.021>
- [18] Omid-Rekavandi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Ghodrattnama, A. (2021). Mathematical modeling for the forward and reverse logistics network design. *Management research in Iran*, 17(4), 43-63. **(In Persian)**.
https://mri.modares.ac.ir/article_3.html?lang=en
- [19] Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2010.04.010>
- [20] Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodríguez, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution. *European journal of operational research*, 177(3), 1599-1609.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.002>
- [21] Keramaty, A., Esmaeliani, M., & Rabieh, M. (2015). A new model for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with discount cash flows. *Industrial management studies*, 13(39), 63-90. **(In Persian)**.
https://jims.atu.ac.ir/article_1979.html