Journal of Modeling in Engineering 21 (2023) 173-190
This is an Open Access paper licensed under the Creative Commons License CC BY 4.0 license.

Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

Research Article

Overhaul Scheduling, considering the limited access to spare parts, reliability, and equipment availability by using fuzzy data

Mahmoud Shahrokhi[1,*], Ahsan Majidi[1]

1. Decomponentment of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran,

*Corresponding Author: Shahrokhi292@yahoo.com

PAPER INFO

Paper history:
Received: 06 September 2022
Revised: 17 January 2023
Accepted: 06 May 2023

Keywords:
Major repairs,
spare parts,
Reliability (RBD),
Accessibility,
Fuzzy data.

ABSTRACT

This article presents a mathematical model to develop the optimal planning for equipment overhaul under limited access to spare parts, uncertainty, and lack of accurate and complete information. The parameters of repair cost, demand, device efficiency, the selling price of each product unit, and production rate are considered fuzzy parameters. First, the system availability is modeled. The results are used in the development of a non-linear mixed integer programming model so that by solving it, the time of equipment overhaul can be determined in such a way as to minimize the total costs of repairs and operation. The presented approach is implemented for a numerical example, including a hypothetical production system. Finally, with the exact solution, using GAMS software, the optimal answer to the desired problem has been obtained and analyzed. The optimal solution sensitivity analysis facing the change of the main parameters of the model is done, and the results are shown in the graphs. Then the problem is resolved again using the fuzzy optimization approach, and the results are compared with the previous solution method. These results indicate that the fuzzy approach has excellent flexibility in transferring decision-maker's expectations to the modeling process. In this way, the analyst's opinion regarding the prioritization of the objective functions can be well reflected in the mathematical programming model.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2023.28309.2331

How to cite this article:
Shahrokhi, M., & Majidi, A. (2023). Overhaul Scheduling, considering the limited access to spare parts, reliability, and equipment availability by using fuzzy data. Journal of Modeling in Engineering, 21(74), 173-190.
doi: 10.22075/jme.2023.28309.2331

زمانبندی تعمیرات اساسی، با توجه به محدودیت دسترسی به قطعات یدکی، قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری تجهیزات و با استفاده از داده‌های فازی

محمود شهرخی[1*]، احسن مجیدی[2]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵
بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶

واژگان کلیدی:
تعمیرات اساسی
قطعات یدکی
قابلیت اطمینان (RBD)
دسترسی‌پذیری
داده فازی

چکیده

این مقاله یک مدل ریاضی در راستای برنامه‌ریزی مطلوب تعمیرات اساسی ماشین‌آلات، در شرایط محدودیت دسترسی به قطعات یدکی، عدم قطعیت ارائه می‌کند. پارامترهای هزینه تعمیرات، تقاضا، راندمان دستگاه‌ها، قیمت فروش هر واحد محصول و میزان تولید به‌عنوان پارامترهای فازی در یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه مختلط عدد صحیح غیرخطی به‌کاربرده شده‌اند. با حل این مدل، زمان انجام تعمیرات اساسی تجهیزات به‌گونه‌ای مشخص شود که سود بیشینه شده و به طور همزمان زمان تعمیرات کمینه و قابلیت اطمینان نیز بیشینه شود. دو روش بهینه‌سازی نیل به هدف و بهینه‌سازی فازی به عنوان رویکردهای حل مثال عددی، برای یک سیستم تولیدی فرضی استفاده شده‌اند. با حل مسئله، با استفاده از نرم‌افزار GAMS، پاسخ‌های بهینه مثال موردنظر، برای هر دو روش حل محاسبه و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. تحلیل حساسیت پاسخ بهینه، نسبت به تغییر پارامترهای اصلی مدل انجام‌شده و نتایج به‌صورت نمودار نشان داده‌شده است. این نتایج بیانگر آن است که رویکرد فازی نسبت به روش نیل به هدف، انعطاف زیادی در انتقال انتظارات تصمیم‌گیرندگان به فرآیند مدل‌سازی دارد، زیرا با استفاده از آن می‌توان به‌خوبی نظر تحلیل‌گر را در رابطه با اولویت‌بندی توابع هدف، در مدل برنامه‌ریزی ریاضی، منعکس نمود.

۱- مقدمه

توقف تجهیزات در صنایع با عملکرد پیوسته موجب زیان بسیاری می‌گردد. در این میان، سیستم‌های راهبردی مانند پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی و نیروگاه‌های هسته‌ای دارای سطح بالایی از پیچیدگی هستند و دسترسی‌پذیری و قابلیت اطمینان آن‌ها در سطح بسیار بالاتری موردنیاز است. با این وجود، غالباً خرابی تجهیزات و در پی آن توقف‌های پیش‌بینی‌نشده، حتی در حساس‌ترین و راهبردی‌ترین سیستم‌های صنعتی رخداده و اجتناب‌ناپذیر است. لذا برنامه‌ریزان همواره در پی انجام تعمیرات اساسی در این سیستم‌ها در دوره‌های مشخص هستند تا با تعمیر و تعویض قطعات فرسوده، قابلیت آن‌ها را افزایش دهند. هنگامی که ریسک شکست یا خرابی دستگاه به حد معینی برسد، تعمیرات اساسی یا بازسازی صورت می‌گیرد. این تعمیرات فعالیتی برنامه‌ریزی‌شده است که از کوچک‌ترین قطعات و لوازم مکانیکی و الکترونیکی گرفته تا دستگاه‌ها و ابزارهای صنعتی را در برمی‌گیرد. در این رویداد مهندسی، بسیاری از اجزا و دارایی‌های کارخانه باید از هم جدا شوند، عملیات اصلاحی روی آن‌ها انجام شده یا تعویض شده و مجدداً مونتاژ شوند. درصورتی‌که در شرایط تحریمی، قطعات یدکی در دسترس نباشد، نمی‌توان انجام تعمیرات اساسی را بر طبق دوره‌های استاندارد به اجرا درآورد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Shahrokhi292@yahoo.com
۱. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان
۲.کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

مسئله‌ی این پژوهش مشخص کردن بهترین زمان تعمیرات اساسی تجهیزات در حالتی است که محدودیت دسترسی به قطعات یدکی و همچنین دوره‌ی خرید آن‌ها، مانع انجام تعمیرات اساسی بر طبق زمان‌بندی تعیین‌شده می‌گردد. در این حالت، از یک سو، با توقف اختیاری سیستم، تولید و سودآوری از دست می‌رود و از سوی دیگر، با ادامه کار سیستم، ریسک خرابی و توقف ناخواسته آن افزایش می‌یابد. هدف اصلی این پژوهش تحلیل هزینه و دسترسی‌پذیری برای انتخاب بهترین زمان انجام تعمیرات اساسی تجهیزات با درنظر گرفتن محدودیت‌های تأمین قطعات یدکی آن‌ها است.

۲- مرور ادبیات

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی برنامه تعمیرات و نگهداری به‌صورت زیر طبقه‌بندی شده‌اند:

۲-۱- بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری

ادبیات موجود بیشتر تمایل دارد که فواصل تعمیرات اساسی را با بهینه‌سازی هزینه ، با در نظر گرفتن تعمیر و نگهداری ناقص، که به‌طورکلی شامل CBM/CM[1] به‌عنوان ناقص است، تعیین کند. علاوه بر تعداد بهینه تعمیرات اساسی، کیفیت تعمیرات اساسی نیز به همان اندازه برای دستیابی به نتایج مطلوب ازنظر عملکرد بهتر سیستم مهم است (شارما[2] و همکاران[۱]). ازنظر هندیانی[3] و همکاران کارآیی عملیاتی سیستم‌های تولید برق باید با انجام تعمیرات دوره‌ای حفظ شود[۲]. آن‌ها با هدف تعیین تغییرات عملکرد ژنراتور توربین گازی پیش و پس از تعمیرات اساسی از مفهوم قانون اول ترمودینامیکی برای تجزیه‌وتحلیل عملکرد نیروگاه‌ها در بازه‌های مختلف استفاده کردند و راندمان کمپرسور، راندمان توربین، راندمان حرارتی، مصرف سوخت و میزان گرما را اندازه‌گیری نمودند. بیشترین افزایش پس از تعمیرات اساسی در راندمان کمپرسور ۱. ٪۳۶، بازده توربین ۰. ۰۱۹٪ و راندمان حرارتی ۰. ۸۰۵٪ بود. بیشترین صرفه‌جویی سوخت ۰. ۲۰ کیلوگرم در ثانیه یا معادل ۱۷. ۲۸۰ کیلوگرم در روز گاز طبیعی بود.

صبوحی[4] و همکاران برای اجزاء نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، از قبیل نیروگاه توربین بخار و نیروگاه توربین گاز یک چارچوب مبتنی بر ریسک را بسط دادند و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات را با شرط نبودن منابع کافی اولویت‌بندی کردند[۳]. تأثیرات ناشی از خرابی سیستم مانند ایمنی، نگرانی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌ها با تبدیل به شاخص ریسک در کنار قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفتند.

ازنظر شچرباکووا[5] تأثیر تعمیرات اساسی و نوسازی تجهیزات نیاز به سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی دارد و بنابراین امکان‌سنجی آن‌ها باید بررسی شود[۴]. او به بررسی تأثیر اقتصادی تعمیر یا نوسازی، بر تغییر ارزش شرکت پرداخت. در مرحله اول، برای انتخاب بهینه بین تعمیرات اساسی و نوسازی تجهیزات قدیمی و یا خرید تجهیزات جدید، اثر احتمالی اقتصادی تعمیرات را با میزان هزینه‌هایی که در صورت انجام این تعمیر موردنیاز است، مقایسه کرد. در مرحله دوم، باید امکان دستیابی به چنین تجهیزاتی را، چه جدید و چه استفاده‌شده، در شرایط مناسب درنظر گرفت. او پیشنهاد کرد که هزینه جایگزینی اشیاء با میزان هزینه تعمیرات اساسی و نوسازی مقایسه شده و شاخص‌های افزایشی تحلیل شوند. این روش با در نظر گرفتن فرصت‌های اقتصادی و مالی شرکت می‌تواند به تجزیه‌وتحلیل تعمیر و نوسازی سرمایه مفید باشد. لاپا[6] و همکاران باهدف قرارداد قابلیت اطمینان و هزینه، مدل برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه را برای نیروگاه هسته‌ای ایجاد کرده‌اند[۵]. آن‌ها از توزیع وایبل استفاده کرده و نرخ خرابی تجهیزات را بر اساس عمر آن‌ها مشخص کردند. به دلیل وابستگی پارامترها و غیرخطی بودن آن‌ها، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شد.

به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان، ناکامانور[7] و همکاران روش نگهداری و تعمیرات قابلیت اطمینان محور را برای پالایشگاه نفت پیشنهاد کردند[۶]. نخست فرآیندهای پالایشگاه شناسایی گردید، به دنبال آن نمودار بلوکی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها بابت محاسبه قابلیت اطمینان تجهیزات در هر زیرسیستم ترسیم شده و قابلیت اطمینان کلی سیستم تولید مشخص شد. فرآیندهای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات برای به حداکثر رساندن بهره‌وری فرآیندهای پالایشگاه، توسعه داده‌شد. کاسترو و کاوالکا[8] یک رویکرد بهینه‌سازی دسترسی‌پذیری را برای سیستم‌های با

[1] Condition Based Maintenance / Condition Monitoring
[2] Sharma
[3] Handayani
[4] Sabouhi
[5] Shcherbakova
[6] Lapa
[7] Nakamanuruck
[8] Castro and K. L. Cavalca

اجزای افزونه و منابع نگهداری و تعمیرات اصلاحی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارئه دادند[۷]. تابوادا[1] و همکاران به تجزیه‌وتحلیل مدیریت قابلیت اطمینان و نگهداری توربین‌های بادی فراساحلی پرداختند[۸]. سه هدف شامل تجزیه‌وتحلیل هزینه-فایده هر مدل استراتژی نگهداری و تعمیرات، بهینه‌سازی این استراتژی‌ها، و نشان دادن اثربخشی استراتژی‌ها، در نظر گرفته شد. مدل‌های چرخه عمر تصادفی و احتمالی هستند. هزینه بهره‌برداری و نگهداری مستقیماً به میزان خرابی، هزینه قطعات یدکی و زمان موردنیاز تکنسین بستگی دارد. برای هر مطالعه موردی استفاده از کشتی‌های سبک یا کشتی‌های نفتی تأثیر زیادی بر هزینه‌های عملیاتی حمل‌ونقل دارد. با توجه به تحلیل هزینه‌های چرخه عمر طبیعی نتیجه بر آن شد که استفاده از کشتی‌های سبک مناسب‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر از کشتی‌های نفتی است. هزینه‌های تعمیرات در سطح عملیاتی و لجستیکی برای حالت استفاده از کشتی سبک ۵۸/۴۲ دلار و برای استفاده از کشتی‌های نفتی ۵۷۳۸/۸ دلار در ساعت به دست آمد. شارما و همکاران فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در MRO[2] بررسی‌های برنامه‌ریزی‌شده عادی را پوشش دادند که به‌عنوان نگهداری پیشگیرانه شناخته می‌شود، درحالی‌که تعمیرات اساسی کل سیستم را در یک‌زمان برنامه‌ریزی‌شده بازبینی و جوان‌سازی می‌کند. هدف این پژوهش توسعه مدل ریاضی برای برآورد پارامترهای قابلیت اطمینان بود. برای تجزیه‌وتحلیل، داده‌های دو مجموعه توربو استارتر و پمپ پیستونی در نظر گرفته شدند. تجزیه‌وتحلیل بر عملکرد و در دسترس بودن اجزا متمرکز بود که به‌طور مستقیم بر تجزیه‌وتحلیل هزینه تأثیر می‌گذارند. هدف پژوهش توجه به کیفیت تعمیرات اساسی انجام‌شده بر روی سیستم بود.

۲-۲-پژوهش‌های مرتبط با بهینه‌سازی هزینه

به گفته فتاح و سودیرنو[3] واحد خدمات تعمیر و نگهداری سه هدف اصلی کیفیت، هزینه و اجرای به‌موقع فعالیت‌های نگهداری را دارد[۹]. آن‌ها در این پژوهش بهینه‌سازی کیفیت، مدت، سود و به حداقل رساندن بودجه مدیریت پروژه اصلاح واحدهای توربین گازی را مورد نظر قرار دادند. ابزار مورد استفاده در این مطالعه نمودارهای یامازومی[4] و شاخص بارگذاری[5] بودند. نتایج نشان داد درصد فعالیت ارزش‌افزوده ۳۸٪، غیر ارزش‌افزوده لازم ۵۱٪ و غیر ارزش‌افزوده ۱۱٪ از تعمیرات اساسی کل بود. آن‌ها دریافتند که می‌توان مدت زمان تعمیرات اساسی در برنامه‌های کاری را از برنامه‌هایی که در آغاز برای ۳۲ روز برنامه‌ریزی‌شده‌اند، به ۱۸ روز رساند. کاسترو و کاوالکا با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه کردن دسترسی‌پذیری یک سیستم سری با اجزای افزونه پرداختند[۷]. هدف آن‌ها حداکثر کردن دسترسی‌پذیری با محدودیت منابع نگهداری و تعمیرات اصلاحی بود. آن‌ها تنها نگهداری و تعمیرات اصلاحی را در نظر گرفته و توزیع احتمال خرابی اجزاء را برای محاسبه هزینه نگهداری و تعمیرات اصلاحی به‌صورت نمایی در نظر گرفتند. شایسته[6] و همکاران بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداری یک سیستم برق یکپارچه منابع انرژی تجدیدپذیر را در نظر گرفتند[۱۰]. آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های نگهداری و تعمیرات، بهترین روش کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان را یافتند. تابع هدف مدنظر از نوع هزینه بود که هزینه‌های عملیاتی، توقف و زیست‌محیطی را دربرمی‌گرفت. آن‌ها مدل پیشنهادی خود را با روش شبیه‌سازی حل کردند. پیاسون[7] و همکاران بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع برق را با یک مدل چندهدفه بررسی کردند[۱۱]. هدف آن‌ها کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم بود و با استفاده از سیستم استنتاج فازی، قابلیت اطمینان این شاخص‌ها را محاسبه کردند. مدل دو هدفه آن‌ها با استفاده از الگوریتم NSGA-II[8] حل‌شده و مرز پارتو بهینه به دست آمد.

۲-۳-پژوهش‌های مرتبط برنامه‌ریزی تعمیرات اساسی

ژانگ و جاردینیک[9] مدل ریاضی جدید را برای توصیف بهبود سیستم حاصل از تعمیرات اساسی ارائه کردند که در آن وضعیت تصمیم‌گیری تعمیرات و نگهداری را با توجه به سه حالت حداقل تعمیرات، تعمیرات اساسی دوره‌ای و تکرار کامل موردبررسی قرار دادند[۱۲]. آن‌ها با در نظر گرفتن روند کاهش مستقیم میزان خرابی سیستم، دو مدل هزینه

[1] Taboada
[2] Maintenance, Repair and Overhaul
[3] Fattah and Sudiarno
[4] Yamazumi
[5] NASATask (NASA-TLX)
[6] Shayesteh
[7] Piasson
[8] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
[9] Zhang and Jardine

برای تعیین بازه بهینه تعمیرات اساسی و تعداد تعمیرات اساسی ارائه کردند که هزینه واحد مورد انتظار یا کل هزینه را به حداقل می‌رساند.

اوسیا[1] و همکاران اصول فن‌آوری تعمیرات پیشگیرانه تجهیزات برنامه‌ریزی‌شده و همچنین اصول تعمیر با در نظر گرفتن شرایط فنی تجهیز لوکوموتیو را در نظر گرفتند[۱۳]. هدف اصلی آن‌ها بهینه‌سازی چرخه تعمیر لکوموتیوها به‌منظور اطمینان از قابلیت اطمینان بالای تجهیزات با کمترین هزینه بود. آن‌ها استراتژی نگهداری و تعمیر ناوگان حرکتی را مطابق با روش تعمیر پیشگیرانه برنامه‌ریزی‌شده، با در نظر گرفتن شرایط فنی و ارائه الگوریتمی برای یافتن زمان بهینه بین تعمیرات اساسی و با در نظر گرفتن خرابی تدریجی و ناگهانی تجهیزات لوکوموتیو تدوین کردند. مدل خرابی‌های تدریجی و عملکرد، شامل مقادیر مسافت پیموده شده و تحمل لوکوموتیوها ارائه شد. نتایج پژوهش برای تعیین مقادیر زمان کار استاندارد واحد مونتاژ در معرض هر دو شکست تدریجی و ناگهانی در عملکرد، الگوریتم عمومی‌تری از عملکرد هدف را تدوین کرد که شامل تجزیه‌وتحلیل خطاهای نوع اول و دوم بود. مشخص شد که در هنگام بهینه‌سازی چرخه تعمیر لکوموتیوها هم‌زمان با درنظر گرفتن همزمان خرابی تجهیزات تدریجی و ناگهانی، کاهش تعداد تعمیرات غیر برنامه‌ریزی‌شده به ۱۰ تا ۱۵ درصد می‌رسد و تعداد تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده نیز ۱۲ تا ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. هدف واهیو[2] و همکاران تعیین بازه زمانی بهینه با درنظر گرفتن جنبه‌های ریسک، جنبه‌های خطای انسانی و جنبه‌های مالی به‌طور هم‌زمان بود[۱۴]. روش پیشنهادی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان تاسیسات با استفاده از ابزار ماتریس ریسک بحرانی[3] و تعیین بازه زمانی بهینه بود. آن‌ها موفق شدند تعداد تجهیزات لازم برای تجزیه‌وتحلیل را کاهش داده و به نحو مؤثری الگوریتم ژنتیک را در فرآیند بهینه‌سازی عملکرد غیرخطی مورد استفاده قرار دهند. از تفاوت بین مدل درآمد خالص و هزینه کل مدل سود ایجاد می‌گردد.

پالسینی[4] به تجزیه‌وتحلیل آماری، از دیدگاه بیز، از داده‌های خرابی واحدهای مکانیکی قابل تعمیر در معرض حداقل تعمیرات و تعمیرات اساسی دوره‌ای پرداخت[۱۵]. فرض وی آن بود که فرایند شکست بین دو دوره تعمیرات اساسی پی‌درپی توسط فرایند قانون توان، قابل مدل‌سازی است با یک مدل کاهش عمر متناسب، اثر تعمیرات اساسی در قابلیت اطمینان واحد را مدل کردند. مقادیر زیادی از داده‌ها، بر اساس تعدادی از تراکم‌های قبلی گردآوری شد که نشان‌دهنده درجات مختلف اعتبار در روند شکست/تعمیر بود. آن‌ها برآورد نقطه‌ای و فاصله‌ای از پارامترهای مدل را تعیین و آزمون‌های فرضیه در مورد اثربخشی تعمیرات اساسی بر اساس فاکتور بیز و برخی از دستورالعمل‌ها برای انجام تجزیه‌وتحلیل حساسیت در مقابل اطلاعات قبلی را انجام دادند. در آخر یک برنامه عددی روش‌های استنتاج و آزمایش پیشنهادی کردند.

سراوانان[5] و همکاران به بررسی استراتژی‌های بهبود برای کاهش زمان تعمیرات اساسی پرداختند[۱۶]. رویکرد این پژوهش بر اساس دانش موجود و سوابق کار در واحد تعمیرات اساسی در مدت طولانی انجام شد. آن‌ها از یک رویکرد یکپارچه از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[6] در فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی خاص (AHP)، تئوری محدودیت (TOC) و شبیه‌سازی محیط برای تعیین استراتژی‌های بهبود استفاده کردند.

هدف راسو[7] برنامه‌ریزی تعمیرات اساسی انواع هواپیماها بر اساس دانش موجود و سوابق انجام تعمیر و نگهداری هواپیماهای نیروی هوایی صربستان بود[۱۷]. تجزیه‌وتحلیل کلی و پردازش داده‌های جمع‌آوری‌شده در حین انجام مراحل تعمیر و نگهداری و تعمیر انجام شد. داده‌ها مربوط به تشخیص تأخیرها و خطاهایی بود که در طی مراحل عملیاتی و بین عملیاتی تعمیرات اساسی هواپیما رخداده است. بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهادی برای بهینه‌سازی تعمیرات اساسی و تدارکات فنی و دستیابی به هدف بهینه‌سازی همه‌جانبه تعمیرات اساسی هواپیماها به کار گرفته شد.

سیلوا[8] و همکاران برای جلوگیری از تأخیر در تأمین برق در نیروگاه‌ها، بعد از تعمیرات اساسی به بررسی سناریوهای مختلف پرداخته‌اند[۱۸]. تأخیرها منجر به افزایش هزینه‌ها

[1] Osyaev
[2] Wahyu
[3] Criticality Risk Matricity
[4] Pulcini
[5] Saravanan
[6] Multiple Criteria Decision Making (**MCDM**)
[7] Rašuo
[8] Silva

به دلیل وقفه در تولید برق می‌شود. هرکدام از سناریوها زمان تأخیر را با هزینه مربوطه مرتبط می‌کردند. برای انتخاب سناریوهایی که کمترین تأخیر را داشته باشد از تکنیک Max-min در نظریه بازی استفاده‌شد. یک مطالعه موردی در یک نیروگاه نشان داد که چگونه زیان‌های مالی ناشی از تأخیر درنتیجه انتخاب بهترین سناریو توسط مدیران بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه کاهش می‌یابد. برخلاف پژوهش‌های پیشین، این پژوهش سه تابع هدف هزینه، زمان تعمیرات و قابلیت اطمینان را باهم موردبررسی قرارداد. استفاده از پارامترهای فازی و لحاظ کردن نظرات خبرگان یکی دیگر از نوآوری‌های آن بود.

در غالب پژوهش‌های پیشین، فرض بر این بوده است که قطعات یدکی در زمان دلخواه و به اندازه کافی در بازار در دسترس می‌باشد. در صورتی که در حال حاضر این فرض در شرایط کنونی صنایع کشور حاکم نیست. توسعه مدل سه هدفه با اهداف حداکثر کردن سود، حداقل کردن زمان تعمیرات و حداکثر کردن قابلیت اطمینان و در نظر گرفتن محدودیت‌های عدم دسترسی به قطعات یدکی در مدل، این پژوهش را به شرایط واقعی نزدیکتر می‌کند. استفاده از داده های فازی در مدل، نوآوری دیگر پژوهش است.

۳- بیان مساله

به دلیل محدودیت‌های مربوط به تأمین قطعات که ناشی از وجود تحریم‌های اقتصادی، در بسیاری از موارد، صنایع بزرگ امکان انجام تعمیرات اساسی بر طبق زمان‌بندی تعیین‌شده را ندارند. هدف اصلی این پژوهش لحاظ کردن محدودیت قطعات یدکی در انجام تحلیل قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری و تعیین بهترین زمان انجام تعمیرات اساسی تجهیزات است. همچنین تصمیم‌گیری در مورد لزوم توقف آن‌ها تا زمان تأمین قطعات یدکی، برای پیشگیری از وقوع خرابی غیرمنتظره و صدمات اقتصادی و جانی، از گزینه‌های موردبررسی در این پژوهش است.

۳-۱- مفروضات مساله

۱. تولید تک‌محصولی است و توسط تعداد مشخصی ماشین‌های یکسان انجام می‌شود.
۲. تولید محصول نیازمند انجام فرآیندی است که می‌تواند توسط تمامی ماشین‌ها باکیفیت یکسان انجام شود.
۳. سفارش بین‌راهی وجود ندارد.
۴. ذخیره بین‌راهی وجود ندارد.
۵. تقاضای هرماه مشخص بوده و باید توسط تولید همان ماه پوشش داده شود.
۶. قیمت فروش هر واحد محصول در همه ماه‌ها ثابت و مشخص است.
۷. هنگام تعمیرات اساسی بر روی یک ماشین تولید آن متوقف می‌شود.
۸. هر ماشین در کل دوره‌ها حداکثر یک‌بار تعمیر اساسی می‌شود.
۹. زمان‌های عیب‌یابی و تأمین قطعات یدکی ناچیز هستند.
۱۰. ظرفیت انجام تعمیرات اساسی در هرماه حداکثر به تعداد n^o است.
۱۱. تعمیر اساسی برای هر ماشین تنها در صورت وجود قطعه یدکی برای آن امکان‌پذیر است.
۱۲. هزینه خرید قطعه یدکی در همه دوره‌ها ثابت و ناچیز است.
۱۳. هزینه تعمیرات هر ماشین وابسته به زمان تعمیرات است.
۱۴. نگهداری قطعه یدکی برای هر ماشین i در هرماه t مستلزم پرداخت هزینه (C_{it}^h) است.
۱۵. قابلیت اطمینان هر ماشین (مانند ماشینi) در طول زمان کاهش می‌یابد و پس از تعمیر اساسی در ماه t به R'_{it} می‌رسد.
۱۶. راندمان دستگاه در طی زمان کاهش می‌یابد.
۱۷. راندمان دستگاه پس از انجام تعمیر اساسی بهبود می‌یابد.

۳-۲- روش پژوهش

در این پژوهش، نخست کارکردهای دقیق هر یک از اجزاء سیستم موردنظر شناسایی و انواع خرابی و پیامدهای آن‌ها مشخص می‌گردد. سپس بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده، مناسب‌ترین روش‌ها برای افزایش دسترسی‌پذیری ارائه می‌شود. نحوه محاسبه دسترسی‌پذیری سیستم مدل در حالتی مدل می‌شود که تقاضای کالا و راندمان تجهیزات عدم قطعیت داشته و به‌صورت اعداد فازی بیان شده‌اند. سپس، نتایج در توسعه یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی به‌کاربرده می‌شود تا زمان انجام تعمیرات اساسی تجهیزات را به‌گونه‌ای مشخص کند که مجموعه هزینه‌های تعمیرات و بهره‌برداری را کمینه کند. رویکرد ارائه‌شده برای یک سیستم فرضی اجرا شده است..

۳-۳- ارائه مدل ریاضی

در این بخش نخست پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله و سپس مدل ریاضی شامل، تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه می‌شود.

- پارامترها:

i : شمارنده ماشین یا دستگاه (i=1,2,…,I)

t : شمارنده دوره (ماه) (t=1,2,.. ,T)

P_i : ظرفیت تولید اسمی ماشین iام

$\tilde{e}_{it}$: راندمان دستگاه iام در دوره tام پیش از تعمیر اساسی

$\hat{\tilde{e}}_{it}$: راندمان دستگاه iام در دوره tام پس از تعمیر اساسی

$\tilde{P}^d_{it}$: تولید دستگاه i در دوره t با درنظر گرفتن راندمان و اجرای تعمیر اساسی

P_{it} : تولید واقعی دستگاه i در دوره t دستگاه با توجه به راندمان و میزان در دسترس‌پذیری آن

$\tilde{d}_t$: میزان تقاضای تولید در ماه t ام

R'_{it} : قابلیت اطمینان دستگاه iام در دوره tام بعد از انجام تعیمرات اساسی

R^b_{it} : قابلیت اطمینان دستگاه iام در دوره tام قبل از تعمیراساسی

t^d_{it} : زمان از دست رفته دستگاه iام در دوره tام

C^h_{it} هزینه نگهداری قطعه یدکی برای ماشین i در دوره t

C^h_S : کل هزینه نگهداری قطعات یدکی همه ماشین‌ها در همه دوره‌ها

$\tilde{C}^m_{it}$: هزینه تعمیرات برای ماشین i در دوره t

$\tilde{C}^m_S$: کل هزینه تعمیرات همه‌ی ماشین‌ها در همه دوره‌ها

$\tilde{P}^s$: کل تولید سیستم در همه دوره

$\tilde{V}$: قیمت فروش هر واحد محصول

V^s : سود ناخالص کل حاصل از درآمد فروش منهای هزینه‌های نگهداری قطعات یدکی و تعمیرات

n^o : توان واحد تعمیراتی

t^f_{it} : مدت زمان تعمیر ماشین i در دوره t

G : آرمان مورد نظر برای هر تابع هدف

M : عدد بزرگ

w_1 : وزن اهداف اول

w_2 : وزن هدف دوم

w_3 : وزن هدف سوم

- متغیرهای تصمیم:

t^o_i : دوره بهینه تعمیر اساسی برای ماشین i ($t^o_i = 0$ یعنی دستگاه i در هیچ دوره‌ای تعمیر اساسی نمی‌شود)

t^h_i : دوره بهینه خرید قطعه یدکی برای ماشین i ($t^o_i = 0$ یعنی قطعه یدکی دستگاه i در هیچ دوره‌ای خرید نمی‌شود)

Y_{it} : برابر ۱ اگر ماشین i در دوره t تعمیر شود و صفر در غیر اینصورت

U_{it} : اگر تعمیر اساسی در زمان t یا قبل از آن بر روی ماشین i انجام شده باشد $U_{it} = 1$ و در غیر اینصورت صفر.

Q^h_{it} : متغیر باینری، برابر ۱ اگر قطعه یدکی در دوره t برای ماشین i در انبار وجود داشته باشد و برابر صفر در غیر اینصورت

$\tilde{f}_{it}$: راندمان ماشین i در ماه t با توجه به زمان تعمیر اساسی

R_{it} : قابلیت اطمینان دستگاه iام در دوره tام با توجه به انجام یا عدم انجام تعمیرات اساسی

$\tilde{g}$: متغیر تابع نیل به هدف

مدل ریاضی مورد نظر دارای اهداف کم کردن هزینه، کم کردن زمان تعمیرات و افزایش قابلیت اطمینان است. توابع هدف و محدودیت‌های مدل به صورت زیر هستند:

$$OF1: Max\ f_1 = D(\tilde{V} \otimes \tilde{P}^s - C^h_S - \tilde{C}^m_S) \quad (۱)$$

$$OF2: Min\ f_2 = (\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} Y_{it} \times t^f_{it}) \quad (۲)$$

$$OF3: Max\ f_3 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} R_{it} \quad (۳)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{I} Y_{it} \le n^o \qquad \forall t \qquad (۴)$$

$$\sum_{t=0}^{T} tY_{it} = t_i^o \qquad \forall i \qquad (۵)$$

$$\sum_{t=1}^{T} Y_{it} \le 1 \qquad \forall i \qquad (۶)$$

$$\tilde{P}^s = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I} \tilde{P}_{it}^d \qquad (۷)$$

$$\tilde{P}_{it}^d = \tilde{f}_{it} \times P_i \qquad \forall t.i \qquad (۸)$$

$$\sum_{i=0}^{I} \tilde{P}_{it}^d \ge \tilde{d}_t \qquad \forall t \qquad (۹)$$

$$\tilde{f}_{it} = \begin{cases} \tilde{e}_{it} & t < t_i^o \\ \tilde{\acute{e}}_{it} & t > t_i^o \\ 0 & t = t_i^o \end{cases} \qquad \forall t.i \qquad (۱۰)$$

$$U_{it} \le U_{it+1} \quad \text{t=1,2, …T-1} \qquad (۱۱)$$

$$R_{it} = \begin{cases} R_{it}^b & t < t_i^o \\ R_{it}' & t > t_i^o \\ 0 & t = t_i^o \end{cases} \qquad \forall t.i \qquad (۱۲)$$

$$C_S^h = \sum_{i}^{I}\sum_{t}^{T} C_{it}^h \times (t_i^h - t_i^o) \qquad (۱۳)$$

$$t_i^h \le Q_{it}^h \times M \qquad \forall t.\forall i \qquad (۱۴)$$

$$Y_{it} \le U_{ip} \qquad \forall i.t < p \qquad (۱۵)$$

$$\tilde{C}_S^m = \sum_{i}^{I}\sum_{t=t_i^h}^{t_i^o} \tilde{C}_{it}^m \otimes Y_{it} \qquad (۱۶)$$

$$t_i^h \le t_i^o \qquad \forall i \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{t=1}^{T} Y_{it} \le t_i^h \qquad \forall i \qquad (۱۸)$$

$$Y_{it} \,.\, U_{it} \in \{0.1\} \qquad t_i^h \,.\, t_i^o \in \mathbb{Z} \qquad \forall t.i \qquad (۱۹)$$

مدل ریاضی این پژوهش متشکل از سه تابع هدف است. هدف اول (۱)، بیشینه کردن مقدار دیفازی سود می‌باشد، که تولید از دست رفته و هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته‌شده است. تابع هدف دوم (۲) برای کاهش زمان تعمیرات اساسی طراحی شده است. تابع هدف سوم (۳) نیز درصدد بیشینه کردن میزان قابلیت اطمینان ماشین‌ها در طول دوره‌ها است.

عبارت ریاضی (۴) محدودیت توان واحد تعمیرات را درنظر می‌گیرد. این واحد با توجه به نیروهای عملیاتی در دسترس در هر دوره توان مشخصی دارد که باید در حل مدل مورد توجه قرار گیرد. عبارت (۵) زمان تعمیرات ماشین‌ها را مشخص می‌کند. این محدودیت با استفاده از مقدار متغیر زمان تعمیر، مقادیر متغیرهای باینری مربوطه را تعیین می‌نماید. براساس عبارت (۶) تعمیرات اساسی می‌بایست در هر دوره برنامه‌ریزی حداکثر یک بار انجام گیرد. معادله (۷) مجموع کلی تولید کلیه ماشین‌ها را در طول دوره برنامه‌ریزی محاسبه می‌کند. عبارت ریاضی (۸) تولید هر کدام از ماشین‌ها را در دوره‌های مختلف را بیان می‌کند. براساس معادله (۹)، میزان تولید در هر دوره می‌بایست برابر یا بیشتر از میزان تقاضای موجود باشد. تابع f_{it} بیان شده در عبارت (۱۰) راندمان تولید ماشین‌ها را براساس زمان قبل از تعمیر، دوره تعمیر و بعد از تعمیر محاسبه می‌نماید. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که راندمان ماشین‌های تعمیر شده در دوره‌های بعد از تعمیر نیز در همان سطح بعد از تعمیر خواهد بود. معادله (۱۲) نیز همانند عبارت تابع f_{it} عمل می‌کند و قابلیت اطمینان ماشین‌ها را در دوره‌های مختلف براساس قبل از تعمیر، دوره تعمیر و پس از تعمیر محاسبه می‌کند. عبارت ریاضی (۱۳) سعی در برآورد هزینه کل نگهداری قطعات یدکی از زمان خرید قطعه تا قبل از تعمیر اساسی را دارد. محدودیت (۱۴) بیان می‌کند که قطعه یدکی پس از خرید در انبار ذخیره می‌شود و متغیر مربوط انبار قطعه به حالت موجود تغییر حالت می‌دهد. معادله (۱۵) بیان می‌کند که ماشین‌ها پس از تعمیر راندمان آن‌ها افزایش یافته و تا انتهای دوره برنامه‌ریزی نیز به همین منوال باقی می‌ماند. معادله (۱۶) هزینه کل تعمیرات کلیه ماشین‌آلات در تمامی دوره‌ها را محاسبه می‌کند. عبارت (۱۷) نشان می‌دهد که حتماً در دوره تعمیرات و یا قبل از آن باید قطعه یدکی خریداری شده باشد. عبارت (۱۸) اگر هر ماشینی در یک دوره‌ای تعمیر اساسی شد باید حتما

قطعه یدکی هم برای آن خریداری شود. معادلات (۱۹) دامنه هر یک از متغیرها را نشان می‌دهد. به خاطر محدودیت‌های و الزامات بهینه‌ساز GAMS می‌بایست معادلات (۱۰) و(۱۲) تغییر یابند به همین دلیل به صورت زیر در مدل نهایی وارد شده‌اند. عبارت (۱۰) به صورت معادله (۲۰) تبدیل خواهد شد.

$$\tilde{f}_{it} = \begin{cases} \tilde{e}_{it} & t < t_i^o \\ \acute{e}_{it} & t > t_i^o \\ 0 & t = t_i^o \end{cases} \qquad \forall t.i \quad (۲۰)$$

$$\tilde{f}_{it} = (1 - Y_{it}) \times \left(\tilde{e}_{it} + \left(\acute{e}_{it} - \tilde{e}_{it}\right) \times U_{it}\right)$$

معادله (۱۲) نیز به همین ترتیب به عبارت (۲۱) تغییر خواهد یافت.

$$R_{it} = \begin{cases} R_{it}^b & t < t_i^o \\ R'_{it} & t > t_i^o \\ 0 & t = t_i^o \end{cases} \qquad \forall t.i \quad (۲۱)$$

$$R_{it} = (1 - Y_{it}) \times \left(R_{it}^b + \left(R'_{it} - R_{it}^b\right) \times Q_{it}^h\right)$$

۴- حل مدل چندهدفه

در این پژوهش برای حل و بررسی مدل ریاضی و مسئله بیان‌شده از روش برنامه‌ریزی نیل به هدف استفاده می‌شود. روش برنامه‌ریزی نیل به هدف به‌نوعی یک روش اقتباس‌شده از برنامه‌ریزی آرمانی است. در برنامه‌ریزی آرمانی سعی در کمینه کردن مجموع فاصله هر یک از توابع هدف از آرمان خود را دارد. اما رویکرد نیل به هدف سعی در کمینه کردن بیشینه فاصله توابع هدف از مقدار آرمان در نظر گرفته را دارد. در این روش برای هریک از اهداف یک آرمان و هدف تعیین می‌شود و رویه موردنظر در جستجوی جوابی خواهد بود که بیشترین انحراف توابع هدف از آرمان‌های مربوط را کمینه کند. یکی از روش‌ها برای به دست آوردن آرمان هر یک از توابع هدف، حل جداگانه مدل مسئله ریاضی برای هر یک از توابع است. در این صورت مدل ریاضی در غیاب دیگر اهداف به‌صورت یک هدفه حل‌شده و نتیجه به‌عنوان آرمان آن تابع هدف گزارش می‌گردد. فرم ریاضی رویکرد نیل به هدف به‌صورت زیر است:

$$\min g(x) \quad (۲۲)$$

$$w_i|f_i - t_i| \leq g(x), \quad (۲۳)$$

که در آن، f بیانگر توابع هدف و t اهداف در نظر گرفته‌شده برای هر یک از آن‌ها (آرمان‌ها) است. یکی از محدودیت‌های این روش آن است که تنها یک نقطه پارتو در هر تکرار تعیین می‌گردد. همچنین، پیدا کردن مناسب‌ترین نقطه آرمانی است که در پیدا کردن جبهه پارتو بسیار تأثیرگذار است. مدل ریاضی فازی به‌صورت زیر خواهد بود.

$$z = \min g \quad (۲۴)$$

$$(\tilde{G}_1 - \tilde{f}_1) \times w_1 < \tilde{g} \quad (۲۵)$$

$$(\tilde{f}_2 - \tilde{G}_2) \times w_2 < \tilde{g} \quad (۲۶)$$

$$(\tilde{G}_3 - \tilde{f}_3) \times w_3 < \tilde{g} \quad (۲۷)$$

مطابق با روش نیل به هدف، هر یک از عبارات (۲۵) تا (۲۷) در مدل این پژوهش به‌صورت زیر خواهند بود:

$$(\tilde{G}_1 - (\tilde{V} \otimes \tilde{P}^s - C_S^h - \tilde{C}_S^m)) \times w_1 < \tilde{g} \quad (۲۸)$$

$$(\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} Y_{it} \times t_{it}^f - G_2) \times w_2 < \tilde{g} \quad (۲۹)$$

$$(G_3 - \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} R_{it}) \times w_3 < \tilde{g} \quad (۳۰)$$

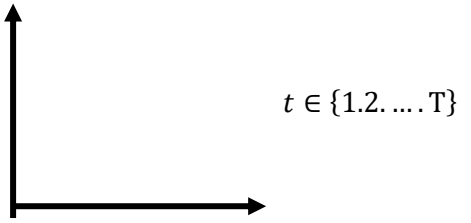
۵- مثال عددی

در این قسمت یک مثال عددی برای مدل ارائه می‌شود. پارامترهای مسئله بر اساس فرض وجود تعداد دوازده ماشین و به‌صورت تصادفی ایجادشده است. تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی برای یک فصل، یعنی یک بازه ۳ ماهه است. جدول ۱ بیانگر ظرفیت تولید اسمی دستگاه‌ها است که به صورت تصادفی در بازه ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ تولید شده‌اند.

تعداد نیروهای عملیاتی برای انجام تعمیرات در آغاز برابر با ۲ گروه کاری در نظر گرفته‌شده است. در پایان این فصل، انجام آنالیز حساسیت بر روی این تعداد گروه‌های عملیاتی انجام می‌گیرد و تأثیر این پارامتر بر نتایج بررسی می‌گردد. مقدار تقاضای محصول به صورت عدد فازی مثلثی نمودار ۱ بوده و در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۱- ظرفیت تولید اسمی دستگاه‌ها

دستگاه	ظرفیت اسمی دستگاه
۱	۱۲۳۱
۲	۱۳۳۸
۳	۱۲۵۸
۴	۱۲۹۵
۵	۱۲۴۲
۶	۱۲۷۹
۷	۱۲۹۱
۸	۱۳۷۱
۹	۱۳۶۵
۱۰	۱۳۸۸
۱۱	۱۲۱۹
۱۲	۱۳۶۶



نمودار ۱- عدد مثلثی تقاضای فازی دوره‌های مختلف

جدول ۲- تقاضای محصول در هر دوره

	$\tilde{d}_t$		
دوره	u_t	m_t	l_t
۱	۷۳۵	۶۱۰	۵۸۵
۲	۷۷۵	۶۰۰	۵۶۶
۳	۷۲۱	۶۳۸	۵۳۵

نقطه مرکزی این اعداد به صورت تصادفی در فاصله ۶۰۰ تا ۶۵۰ تولید شده و سپس گسترش‌های سمت چپ و سمت راست آنها به صورت تصادفی به ترتیب در بازه ۰ تا ۱۰۰ و ۰ تا ۱۵۰ تولید شده‌اند. راندمان هر یک از دستگاه‌های موجود نیز با اعداد فازی نشان داده می‌شوند که همچنین باگذشت زمان به دلیل استهلاک دستگاه کاهش می‌یابد. جدول ۳ مربوط به پیش‌بینی راندمان قبل از تعمیر دستگاه‌ها در هر دوره است. نقطه مرکزی این اعداد به صورت تصادفی در فاصله ۰/۴ تا ۰/۵ تولید شده و سپس گسترش‌های سمت چپ و سمت راست آنها به صورت تصادفی به ترتیب در بازه ۰ تا ۰/۲ و ۰ تا ۰/۲ تولید شده‌اند

جدول ۳- راندمان تجهیزات، به‌صورت اعداد فازی مثلثی

دستگاه	دوره	راندمان قبل از تعمیر		
		l	m	u
۱	۱	۰/۳۳	۰/۴۷	۰/۶۲
	۲	۰/۳۴	۰/۴۷	۰/۵۸
	۳	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۵۷
۲	۱	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۶
	۲	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۶
	۳	۰/۳۵	۰/۵	۰/۶۵
۳	۱	۰/۴	۰/۵	۰/۶۵
	۲	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۶۲
	۳	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۵۸
۴	۱	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۶۷
	۲	۰/۳۳	۰/۴۹	۰/۶۳
	۳	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۶۱
۵	۱	۰/۳۱	۰/۴۹	۰/۶۷
	۲	۰/۴	۰/۴۶	۰/۵۸
	۳	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۶۷
۶	۱	۰/۳۶	۰/۵	۰/۶۳
	۲	۰/۳۲	۰/۴۵	۰/۶۴
	۳	۰/۳۴	۰/۴۷	۰/۶۱
۷	۱	۰/۳۷	۰/۴۷	۰/۶۱
	۲	۰/۳	۰/۴۷	۰/۶۶
	۳	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۵۷
۸	۱	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۶۱
	۲	۰/۴	۰/۴۸	۰/۶۲
	۳	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۵۷
۹	۱	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۶۶
	۲	۰/۳۲	۰/۴۷	۰/۶۱
	۳	۰/۴	۰/۴۷	۰/۶۳
۱۰	۱	۰/۳	۰/۴۵	۰/۵۹
	۲	۰/۳	۰/۴۷	۰/۶۲
	۳	۰/۳۸	۰/۴۶	۰/۶۵
۱۱	۱	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۵۸
	۲	۰/۳	۰/۴۶	۰/۶۶
	۳	۰/۳۹	۰/۵	۰/۵۷
۱۲	۱	۰/۳۳	۰/۴۷	۰/۶۲
	۲	۰.۳	۰.۴۹	۰.۵۹
	۳	۰.۳۳	۰.۴۷	۰.۶۳

انجام درست و به‌موقع تعمیرات می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش بهره‌روی سیستم و افزایش سودآوری کل سیستم داشته باشد. راندمان دستگاه‌ها بعد از انجام تعمیرات به‌طورکلی بهبود می‌یابد و این بهبود تابع دوره انجام تعمیر است. این مقادیر جدول ۴ نشان داده‌شده‌اند. نقطه مرکزی این اعداد به صورت تصادفی در فاصله ۰/۵تا ۰/۶۵ تولید شده و سپس گسترش‌های سمت چپ و سمت راست آنها به صورت تصادفی به ترتیب در بازه ۰ تا ۰/۱ و ۰ تا ۰/۳ تولید شده‌اند. این راندمان مربوط به بعد از انجام تعمیرات باراندمان قبل از تعمیرات مقایسه می‌شود و بر اساس شرایط سیستم و راندمان هر یک از دستگاه‌ها و مقدار تفاوت بین این مقادیر، برای انجام تعمیرات تصمیم‌گیری می‌شود.

جدول ۴- راندمان دستگاه‌ها بعد از تعمیر

دستگاه	دوره	مقدار فازی راندمان دستگاه بعد از تعمیر		
		l	m	u
۱	۱	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۷۸
	۲	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۷۸
	۳	۰/۴۱	۰/۵۶	۰/۷۲
۲	۱	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۷۵
	۲	۰/۴۳	۰/۵۶	۰/۷۷
	۳	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۷۵
۳	۱	۰/۴۷	۰/۶۵	۰/۷۷
	۲	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۷۳
	۳	۰/۵	۰/۵۹	۰/۷۹
۴	۱	۰/۴۳	۰/۵۹	۰/۷۵
	۲	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۷۸
	۳	۰/۴۳	۰/۶۳	۰/۷۱
۵	۱	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۷۱
	۲	۰/۴۲	۰/۶	۰/۷۵
	۳	۰/۴۷	۰/۶۳	۰/۷۹
۶	۱	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۷۸
	۲	۰/۴۱	۰/۵۱	۰/۷۴
	۳	۰/۴	۰/۵۲	۰/۷۱
۷	۱	۰/۴۳	۰/۵۶	۰/۷۳
	۲	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۷
	۳	۰/۴۱	۰/۶۲	۰/۷۲
۸	۱	۰/۴۳	۰/۵۴	۰/۷۲
	۲	۰/۴۹	۰/۶	۰/۷۸
	۳	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۷۸
۹	۱	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۷۸
	۲	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۷۶
	۳	۰/۵	۰/۶۱	۰/۷۲
۱۰	۱	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۷۸
	۲	۰/۴۶	۰/۶۴	۰/۷۷
	۳	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۷۸
۱۱	۱	۰/۵	۰/۶۵	۰/۷۶
	۲	۰/۴۳	۰/۵۳	۰/۷۵
	۳	۰/۵	۰/۵۸	۰/۷۴
۱۲	۱	۰/۴۶	۰/۶۴	۰/۷۲
	۲	۰/۴۴	۰/۶۳	۰/۷۴
	۳	۰/۴۵	۰/۶	۰/۷۲

از دیگر پارامترهای موجود در مدل ریاضی مقدار قابلیت اطمینان دستگاه‌ها است. همچون راندمان دستگاه، قابلیت اطمینان نیز پیش و پس از تعمیرات تغییر می‌کند که جدول ۵ داده‌های مربوط به قبل از تعمیرات را ارائه می‌نماید. قابلیت اطمینان دوره‌های اول، دوم و سوم به صورت تصادفی در بازه‌های ۰ تا ۰/۳ تولید شده‌اند.

جدول ۵- قابلیت اطمینان دستگاه‌ها قبل از تعمیر

دستگاه	قابلیت اطمینان دستگاه‌ها در هر دوره		
	۱	۲	۳
۱	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۹
۲	۰/۲۲	۰/۲	۰/۱۸
۳	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۲
۴	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۳
۵	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۱۶
۶	۰/۲۹	۰/۱۴	۰/۱۴
۷	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۲۴
۸	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲
۹	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۱
۱۰	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۲۵
۱۱	۰/۲	۰/۲۷	۰/۲۶
۱۲	۰/۳	۰/۲۸	۰/۲۴

داده‌های قابلیت اطمینان بعد از تعمیر به شرح جدول ۶ است.

از دیگر هزینه‌های موردتوجه در مدل، می‌توان به هزینه نگهداری قطعات یدکی هر دستگاه اشاره کرد. این هزینه‌ها

در قالب جدول ۷ ارائه شده‌اند. این هزینه‌ها برای دوره‌های اول، دوم و سوم به صورت تصادفی در بازه‌های۲۰ تا ۸۰ تولید شده‌اند.

جدول ۶- قابلیت اطمینان دستگاه‌ها بعد از تعمیر

دستگاه	مقدار قابلیت اطمینان دستگاه‌ها		
	۱	۲	۳
۱	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۵
۲	۰/۵	۰/۴۸	۰/۴۲
۳	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۳
۴	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۴۴
۵	۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۴۴
۶	۰/۵۲	۰/۴	۰/۴۱
۷	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۲
۸	۰/۵۷	۰/۵	۰/۴۹
۹	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۴۷
۱۰	۰/۵۹	۰/۵۲	۰/۴۲
۱۱	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۴۱
۱۲	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۴۸

جدول ۷- هزینه نگهداری قطعات ماشین‌ها(C_{it}^{h})

ماشین	دوره		
	۱	۲	۳
۱	۳۵	۶۵	۲۸
۲	۳۵	۷۷	۲۳
۳	۴۵	۲۱	۳۸
۴	۴۳	۳۲	۶۰
۵	۶۹	۷۷	۶۲
۶	۵۲	۲۳	۵۶
۷	۵۷	۶۸	۳۱
۸	۳۸	۷۷	۴۹
۹	۲۵	۶۱	۶۵
۱۰	۷۶	۴۱	۷۲
۱۱	۴۱	۲۷	۷۵
۱۲	۳۹	۶۵	۵۸

هریک از ماشین‌های موجود در سیستم جهت انجام تعمیرات نیازمند زمان مشخصی هستند. مدت زمان تعمیر دستگاه‌ها بر اساس شرایط هر یک از آن‌ها متفاوت است. در جدول ۸ مقادیر در نظر گرفته‌شده برای این پارامتر بیان شده‌اند. مدت زمان‌های تعمیر برای دوره‌های اول، دوم و سوم به صورت تصادفی در بازه‌های ۳۰ تا ۶۰ تولید شده‌اند.

جدول ۸- مدت‌زمان تعمیر هر دستگاه

دستگاه	مدت‌زمان تعمیر در هر دوره		
	۱	۲	۳
۱	۴۱	۳۷	۴۷
۲	۳۷	۴۲	۵۸
۳	۳۸	۴۸	۲۷
۴	۲۸	۵۰	۳۸
۵	۲۹	۵۳	۴۳
۶	۵۱	۶۰	۳۹
۷	۶۰	۴۷	۴۴
۸	۵۶	۳۱	۵۸
۹	۴۶	۵۶	۵۵
۱۰	۵۷	۶۰	۳۰
۱۱	۵۲	۲۸	۳۸
۱۲	۵۴	۴۳	۲۹

با استفاده از پارامترهای بیان‌شده در بخش قبل و واردکردن آن‌ها در مدل پاسخ‌های زیر به‌دست‌آمده است. جدول ۹ مقدار متغیر دوره تعمیرات هر یک از ماشین‌ها را در پاسخ بهینه، نشان می‌دهد.

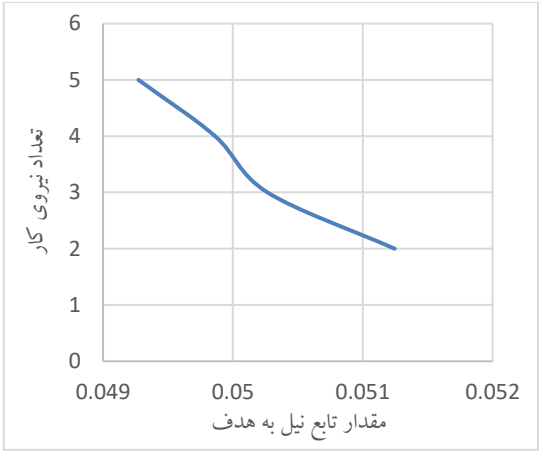
جدول ۹- زمان تعمیر هر یک از ماشین‌ها

ماشین	دوره تعمیرات		
	۱	۲	۳
۱	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰
۳	۰	۱	۰
۴	۰	۱	۰
۵	۰	۰	۰
۶	۰	۰	۱
۷	۰	۰	۰
۸	۱	۰	۰
۹	۰	۰	۰
۱۰	۱	۰	۰
۱۱	۰	۰	۱
۱۲	۰	۰	۰

۶- تحلیل نتایج مدل ریاضی

در شکل (۲) رابطه بین تعداد نیروهای عملیاتی و مقدار تابع نیل به هدف ارائه گردیده است. همان‌طور که از اعداد داخل نمودار پیداست درزمانی که تعداد نیروهای عملیاتی

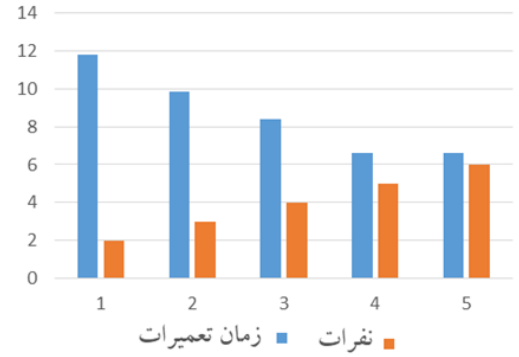
برابر با ۲ نفر است مقدار تابع نیل به هدف برابر با ۰۵۱۲۴۶۳۸۱/. است. در ادامه با افزایش تعداد نیروها به ۴، ۳ و ۵ نفر به ترتیب مقدار به‌دست‌آمده نیل به هدف متناظر آن‌ها برابر با ۰۵۰۳۶۶/. و ۰۴۹۷۶۲۹۴۷/. و ۰۴۹۲۷۲۸۶۵/. است. می‌توان دریافت که افزایش نفرات باعث کاهش مقدار تابع هدف کمینه‌سازی گردیده است و فاصله توابع هدف با مقدار آرمانی آن‌ها کمتر شده است. کمترین مقدار تابع هدف درزمانی به‌دست‌آمده که تعداد نیرو عملیاتی برابر با ۵ بوده است.



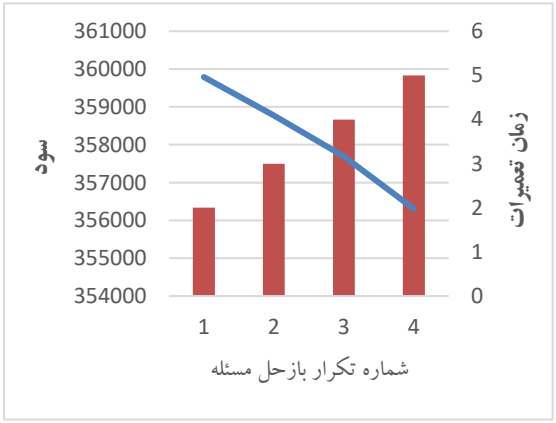
شکل ۲- رابطه تعداد تعمیرکاران با مقدار تابع نیل به هدف

با توجه به نتایج حاصل از بررسی شکل (۲) می‌توان به اهمیت تعداد نفرات شاغل در نیروهای عملیاتی پی برد. در شکل (۳) میزان تأثیر این پارامتر بر روی تابع هدف زمان تعمیر به‌صورت جداگانه موردبررسی قرار می‌گیرد. میله‌های نارنجی در این نمودار، نشان‌دهنده تعداد نفرات شاغل در بخش عملیاتی و نمودار آبی بیانگر مقدار زمان کل موردنیاز برای تعمیر ماشین‌آلات است. با توجه به شکل موردنظر می‌توان دریافت که چگونه با افزایش افراد، زمان کل تعمیرات کاهش می‌یابد. با توجه به مقدار کل زمان تعمیر در هر ۲ تکرار آخر، می‌توان دریافت که در تعداد نیروهای عملیاتی ۵ و ۶ نفر تغییری در مقدار تابع هدف زمان کل اتفاق نیفتاده است به عبارتی ساده‌تر ارتفاع ستون آبی در دو تکرار متوالی تغییر نکرده است پس می‌توان با تعداد ۵ نفر، به‌صورت بهینه به انجام تعمیرات ادامه داد.

شکل (۴) نشان‌دهنده رابطه بین هزینه کل و توان عملیاتی است. برای دست یافتن به این نمودار، از تقابل سود (تابع هدف اول) با تعداد پرسنل استفاده‌شده است، تا بتوان تأثیر این پارامتر را بررسی کرد. با استناد به این نمودار می‌توان دریافت که با افزایش تعداد نیروها مقدار هزینه سیستم برای تعمیرات کاهش‌یافته و سود افزایش می‌یابد. بیشترین سود در زمانی به‌دست‌آمده که تعداد نیروهای عملیاتی برابر با ۵ نفر(تکرار ۴ام) بوده است. افزایش تعداد نیروهای عملیاتی همان‌طور که در نمودار قبلی موردبحث قرار گرفت، باعث تسریع در انجام تعمیرات می‌گردد و مدت‌زمان کل پروسه تعمیر کاهش می‌یابد. همچنین این افزایش نفرات باعث کاهش یافتن هزینه‌های انبار نیز می‌گردد.



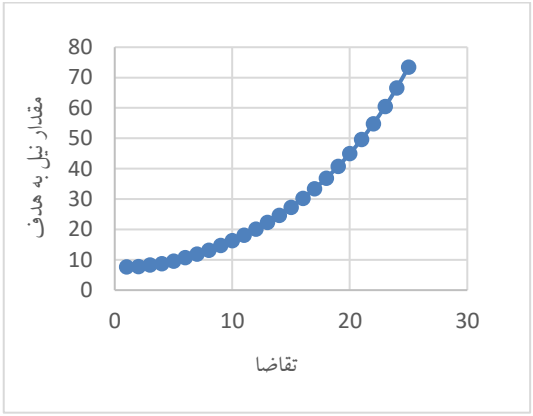
شکل ۳- نمودار تغییر زمان تعمیرات با توجه به تعداد نفرات



شکل ۴- هزینه و تعمیرات

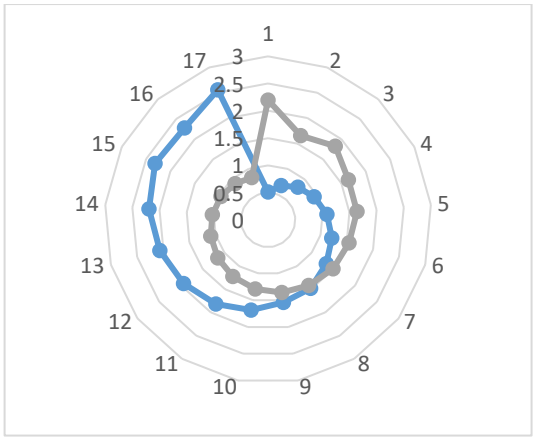
در شکل (۵) مقدار ورودی تقاضای واردشده به مدل را در هر تکرار نسبت به مقدار تکرار پیشین پنجاه‌درصد افزایش داده‌ایم. این تغییرات در تابع هدف اول به دو صورت خود را نمایان می‌کند. نخست آنکه برای عرضه کالا به این تقاضاهای افزایش‌یافته، باید تعمیرات و قطعات یدکی فراهم نمود که این باعث ایجاد هزینه در سیستم می‌شوند و از طرفی دیگر افزایش تقاضا مستلزم تولید بیشتر شده و درنتیجه سود خالص سیستم افزایش می‌یابد. چون سود حاصله بیشتر است، پس افزایش مقدار تابع نیل به هدف می‌بایست مربوط به دیگر توابع باشد. برای تابع هدف دوم

افزایش تقاضا باعث افزایش مقدار تابع هدف یعنی مقدار زمان تعمیر می‌شود و وجود محدودیت در توان نیروهای عملیاتی باعث فاصله گرفتن مقدار تابع هدف از مقدار آرمانی خود می‌شود.

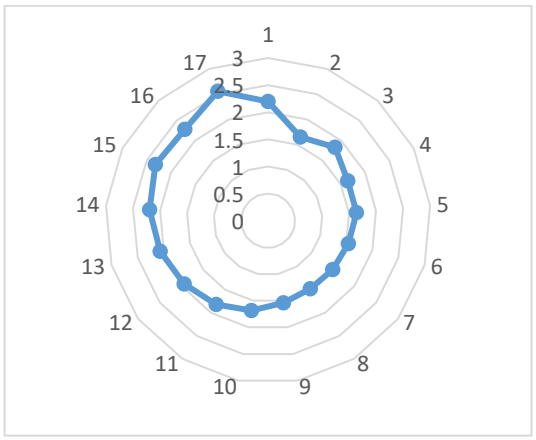


شکل ۵- رابطه مقدار تقاضا و تابع هدف

نمودارهای ۶ و ۷ واکنش مدل‌سازی نیل به هدف به تغییر وزن‌های اختصاصی هر یک از توابع هدف سه‌گانه را نشان می‌دهد. در این تحلیل، مجموع وزن توابع هدف سه‌گانه برابر با ۱ در نظر گرفته‌شده است. همچنین وزن تابع هدف سوم مسئله به‌صورت ثابت در مدل واردشده است. به این ترتیب، با توجه به نمودارهای ۶ و ۷ می‌توان رابطه تابع هدف‌های اول (خاکستری) و دوم (آبی) را در مدل تشریح نمود. هر دو این توابع واکنش زیادی نسبت به تغییر وزن‌ها نشان داده‌اند. در مرحله اول، وزن بیشتری برای تابع هدف اول در نظر گرفته‌شده، ولی در مراحل بعدی، به‌طور متوالی از آن کاسته شده و به وزن تابع هدف دوم افزوده‌شده است. به همین دلیل، در نمودار ۶، در هشت مرحله اول تابع هدف نخست مقدار بیشتری به خود گرفته و به همین خاطر پوسته سمت چپ نمودار ۷ از این هشت مرحله تشکیل‌شده است. در ادامه، در مراحل ۹ تا ۱۷، با توجه به افزایش وزن تابع هدف دوم مقدار تابع آن از تابع هدف اول پیشی می‌گیرد و قسمت چپ نمودار ۷ را ترسیم می‌کند. باید اشاره کرد که نمودار تابع هدف مسئله موردنظر بر دو نمودار دیگر محاط است که این نشان‌دهنده‌ی کارکرد صحیح مدل ریاضی نیل به هدف است. تابع هدف کلی در هر مرحله (بازحل)، سعی در کمینه کردن بیشینه فاصله اهداف دستیابی شده از آرمان‌ها را دارد.



شکل ۶- توابع هدف اول و دوم

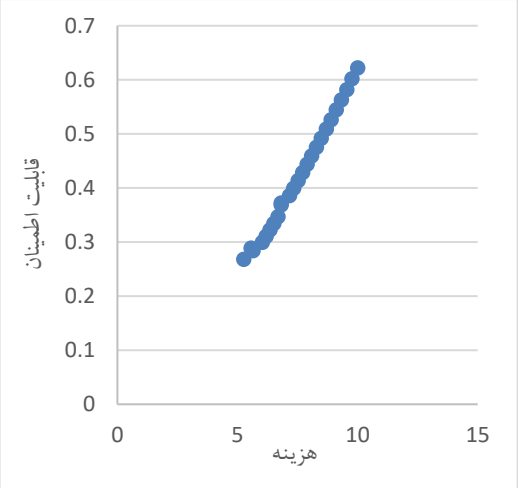


شکل ۷- تابع هدف مدل‌سازی نیل به هدف

شکل (۸) نشان‌دهنده رابطه بین تابع هدف سوم، مقدار قابلیت اطمینان و هزینه‌های مدل است. برای به دست آوردن این نمودار، وزن تابع هدف سوم در مدل‌سازی نیل به هدف (عبارت (۴۶)) به‌صورت پلکانی افزایش‌یافته است و در هر مرحله تأثیر آن بر مقدار توابع (۱) و (۳) به‌عنوان قابلیت اطمینان مدل بررسی‌شده است. طبق این نمودار با افزایش قابلیت اطمینان، هزینه سیستم نیز افزایش می‌یابد. بدیهی است که تأمین قطعات و تعمیرات جهت افزایش قابلیت اطمینان باعث ایجاد هزینه برای کل سیستم می‌شود و اطلاعات نمودار نیز این واقعیت را نشان می‌دهد.

۷- روش بهینه‌سازی فازی

همچون روش نیل به هدف، روش بهینه‌سازی فازی نیز سعی در کاهش فاصله نسبی هر یک از توابع هدف با آرمان در نظر گرفته برای آن‌ها است. در این روش نخست مدل ریاضی برای هر یک از توابع هدف به‌طور جداگانه حل می‌گردد.



شکل ۸- تحلیل رابطه قابلیت اطمینان و تابع هزینه مسئله

برای هر یک از توابع، بدون توجه به هدف بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی، بیشینه و کمینه توابع ($M_n = Max\ f_n$) و ($m_n = Min\ f_n$) با توجه به محدودیت‌ها، محاسبه می‌شوند. درصورتی‌که هدف ماکزیمم سازی تابع هدف nام باشد، M_n به‌عنوان آرمان آن در نظر گرفته خواهد شد و درصورتی‌که مینیمم‌سازی باشد m_n آرمان موردنظر خواهد بود. از سوی دیگر، اهداف اصلی مدل ریاضی به معادله تبدیل می‌شوند و متغیر دیگری به نام λ به‌عنوان هدف بیشینه‌سازی معرفی می‌شود که می‌بایست از مقادیر تمام توابع هدف کوچک‌تر باشد. بدین‌صورت، مدل ماکزیمم فاصله از اهداف را حداقل کند.

۸- فرم ریاضی بهینه‌سازی فازی

اگر مدل ریاضی N تابع هدف داشته باشد. آنگاه:

$$\mathrm{Maxz} = \lambda \qquad (۳۱)$$

$$\lambda_n = \lambda_n \frac{M_n - f_n}{M_n - M_n} \qquad \mathrm{n=1, 2, \ldots N} \qquad (۳۲)$$

$$\lambda_n = \lambda_n \frac{f_n - M_n}{M_n - M_n} \qquad \mathrm{n=1, 2, \ldots N} \qquad (۳۳)$$

$$\lambda \le \lambda_n \qquad (۳۴)$$

از رابطه ۳۲ زمانی استفاده می‌کنیم که تابع هدف مینیمم سازی باشد و برای تابع هدف ماکزیمم سازی از رابطه ۳۳ استفاده خواهیم کرد. پس، مدل ریاضی مسئله به‌صورت زیر خواهد بود.

$$\mathrm{MaxZ} = \lambda \qquad (۳۵)$$

$$\lambda_1 = \mathrm{w}_1 \frac{f_1 - M_1}{M_1 - M_1} \qquad (۳۶)$$

$$\lambda_2 = \mathrm{w}_2 \frac{M_2 - f_2}{M_2 - M_2} \qquad (۳۷)$$

$$\lambda_3 = \mathrm{w}_3 \frac{f_3 - M_3}{M_3 - M_3} \qquad (۳۸)$$

$$\lambda \le \lambda_1 \qquad (۳۹)$$

$$\lambda \le \lambda_2 \qquad (۴۰)$$

$$\lambda \le \lambda_3 \qquad (۴۱)$$

که با واردکردن معادلات به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\mathrm{MaxZ} = \lambda \qquad (۴۲)$$

$$\lambda_1 = \mathrm{w}_1 \frac{(\tilde{G}_1 - (\tilde{V} \otimes \tilde{P}^s - C_S^h - \tilde{C}_S^m)) - M_1}{M_1 - M_1} \qquad (۴۳)$$

$$\lambda_2 = \mathrm{w}_2 \frac{M_2 - (\sum_{i=1}^{I} \sum_{t=1}^{T} Y_{it} \otimes t_{it}^f - \tilde{G}_2)}{M_2 - M_2} \qquad (۴۴)$$

$$\lambda_3 = \mathrm{w}_3 \frac{(G_3 - \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=1}^{T} R_{it}) - M_3}{M_3 - M_3} \qquad (۴۵)$$

$$\lambda \le \lambda_1 \qquad (۴۶)$$

$$\lambda \le \lambda_2 \qquad (۴۷)$$

$$\lambda \le \lambda_3 \qquad (۴۸)$$

در این بخش نیز با استفاده از پارامترهای بیان‌شده در بخش قبل، مدل دوباره حل گردید. جدول ۱۰ بیان‌کننده زمان بهینه تعمیر هر یک از ماشین‌ها در دوره‌های مختلف است.

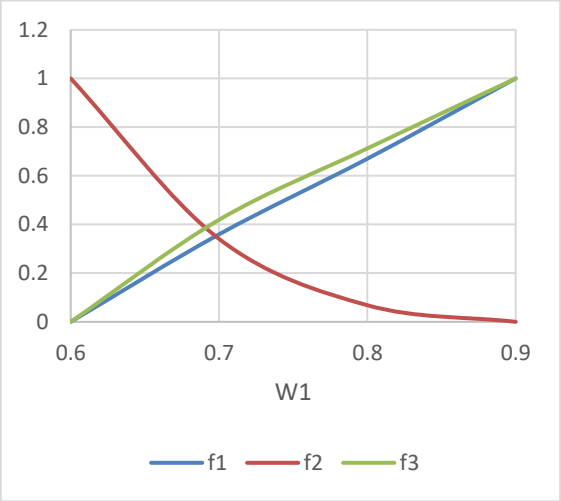
جدول ۱۰- زمان تعمیر هر یک از ماشین‌ها

ماشین	دوره تعمیرات		
	۱	۲	۳
۱	0	0	1
۲	0	0	0
۳	0	0	0
۴	0	1	0
۵	0	0	0
۶	0	0	1
۷	0	1	0
۸	0	0	0
۹	0	0	1
۱۰	1	0	0
۱۱	0	0	0
۱۲	0	0	0

همچنین باید اشاره کرد که با توجه به وزن یکسان توابع هدف، مقدار به‌دست‌آمده از حل مدل برای متغیر λ برابر با ۰/۵ است. مقدار متغیر وضعیت نیز در گزارش گمز برابر با ۱ به‌دست‌آمده است که بر اساس توضیحات نرم‌افزار گمز به معنی تضمین دست‌یابی به جواب بهینه سراسری است.

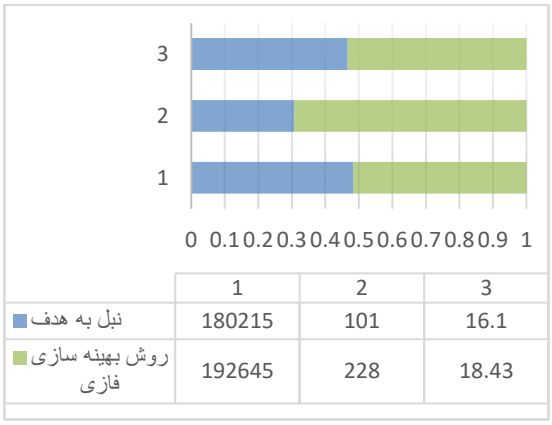
۹- تحلیل نتایج بهینه‌سازی فازی

مسائل چندهدفه بر اساس ماهیت خود در بیشتر اوقات دارای چندین جواب غالب هستند. با توجه به رویکرد متفاوت هر یک از دو روش نیل به هدف و روش بهینه‌سازی فازی، جواب به‌دست‌آمده از این روش‌ها با یکدیگر متفاوت است و در این بخش به مقایسه این نتایج پرداخته می‌شود. با تغییر ضرب وزن تابع هدف اول، مسئله مجدداً حل‌شده و نتایج تغییر بررسی می‌شود. نتایج این تحلیل در نمودار زیر نشان داده‌شده است.



شکل ۹- بررسی تأثیرات ناشی از تغییر ضریب w1 بر روی توابع هدف

نمودار فوق مقدار نرمالایز شده توابع هدف را با روش نرمالایز فازی، در حالتی که وزن تابع هدف اول بین مقادیر ۰/۶ تا ۰/۹ تغییر کند نشان می‌دهد. در این نمودار وزن دو تابع هدف دیگر ثابت و یکسان و برابر ۱ در نظر گرفته‌شده است. با افزایش وزن تابع هدف اول مقدار نرمالایز شده آن بهبود می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که مقدار تابع هدف سوم نیز به موازات آن بهتر می‌شود. این امر نشان‌دهنده آن است که این تابع هدف هم‌جهت بوده و برای افزایش سود کل، می‌باید قابلیت اطمینان نیز افزایش یابد. درعین‌حال با افزایش وزن تابع هدف اول، مقدار نرمالایز شده تابع هدف دوم کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده این نکته مهم است که افزایش سود نیازمند صرف منابع و زمان بیشتری برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات است.



	1	2	3
نیل به هدف	180215	101	16.1
روش بهینه سازی فازی	192645	228	18.43

شکل ۱۰- مقایسه جواب‌های حاصل از روش نیل به هدف و روش بهینه‌سازی فازی

با توجه به شکل (۱۰) که حاصل از مقایسه درصدی و مقداری پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از رویکردهای نیل به هدف و بهینه‌سازی فازی است، می‌توان دریافت که مطابق انتظار هیچ‌کدام از جواب‌های به‌دست‌آمده مغلوب دیگری نیست. در مدل ریاضی مسئله موردنظر تابع هدف اول معرف سود حاصل از کارکرد سیستم است که مدل ریاضی سعی در بیشینه‌سازی آن دارد. جواب به‌دست‌آمده از روش بهینه‌سازی فازی برای این تابع هدف مقدار بیشتری نسبت به روش نیل به هدف دارد. نسبت دو جواب به یکدیگر برابر با ۹۳/. است. هدف دوم مسئله بیانگر مجموع مدت‌زمان تعمیر ماشین‌آلات است که در مدل تابع هدف کمینه‌سازی برای آن ارائه‌شده است. در این بخش از جواب مسئله، روش نیل به هدف توانسته جواب بهتری را ارائه کند و ضمن ارضای تمامی تقاضاها، مجموع زمان کمتری را به بخش تعمیرات اختصاص داده است. نسبت جواب نیل به هدف به روش بهینه‌سازی فازی برابر با ۴۴/. است که نشان‌دهنده اختلاف زیاد مقدار به‌دست‌آمده از روش‌های مذکور است. تابع هدف سوم مسئله سعی در بیشینه‌سازی مقدار متغیر قابلیت اطمینان دارد. در این مورد، روش بهینه‌سازی فازی توانسته به جواب بهتری دست یابد. نسبت مقدار تابع نیل به هدف به مقدار روش بهینه‌سازی فازی برابر با ۸۷/. است.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شده تا با معرفی روش پیشنهادی، به ارائه یک مدل ریاضی در راستای برنامه‌ریزی مطلوب

تعمیرات اساسی ماشین‌آلات در شرایط محدودیت دسترسی به قطعات یدکی پرداخته شود، تا در شرایط عدم قطعیت، خللی در اجرای وظایف ماشین‌آلات صورت نگیرد. عدم قطعیت در این پژوهش، شامل متغیرهای زمان تعمیر و قابلیت اطمینان دستگاه‌ها است که به‌عنوان پارامترهای فازی این پژوهش در نظر گرفته‌شده‌اند. در رویکرد پیشنهادی، نخست، دسترسی‌پذیری یک سیستم صنعتی مدل شده است. سپس نتایج آن در توسعه یک مدل برنامه-ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی به‌کاربرده شده و با حل آن، زمان انجام تعمیرات اساسی تجهیزات به‌گونه‌ای مشخص شده که مجموعه هزینه‌های تعمیرات و بهره‌برداری را کمینه شده است. درنهایت نتایج حاصل از حل دقیق مدل، با نرم‌افزار GAMS، موردبررسی و تأثیر پارامترهای مختلف بر توابع هدف و متغیرها در انواع حالات مختلف، بر اساس نمودارهای به‌دست‌آمده، مورد تحلیل قرارگرفته‌اند. با تغییر مقدار آرمان یا وزن هر تابع هدف پاسخ‌های متفاوتی به دست می‌آید. هرکدام از این پاسخ‌ها با توجه به سیاست‌های کلان مجموعه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۱۱- پیشنهادات آتی

موارد زیر در زمینه‌های جدیدی برای مطالعات آتی می‌تواند در نظر گرفته شود:

۱. در این پژوهش زمان تأمین قطعات یدکی نادیده گرفته‌شده، درحالی‌که این مقدار می‌تواند در بازه‌ی زمانی مختلف متغیر و یا با عدم قطعیت درنظر گرفته شود.
۲. در این پژوهش فرض شده که تقاضای هر ماه باید در آن ماه پوشش داده شود، در پژوهش‌های آتی می‌توان تأمین تقاضا را به ماه‌های بعدی انتقال داد تا با واقعیت نزدیک‌تر باشد.
۳. زمان انجام فعالیت‌های تعمیرات اساسی بر روی هر تجهیز ممکن است با عدم قطعیت همراه باشند.
۴. برای بیان پارامترهای غیرقطعی، در صورت امکان می‌توان از توزیع‌های احتمال و یا انواع دیگر اعداد فازی، بجز اعداد ذوزنقه‌ایی استفاده کرد.
۵. در پژوهش‌های آتی می‌توان علاوه بر وضعیت‌های سالم و خراب برای تجهیزات، می‌توان وضعیت‌های دیگری را نیز در نظر گرفت.
۶. در پژوهش‌های آتی هزینه خرید قطعات را نیز در نظر گرفت.
۷. همچنین می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده کرده و نتایج را با یکدیگر مقایسه کرد.

مراجع

[1] G. Sharma, and R. N. Rai, "Reliability parameter estimation of repairable systems with imperfect maintenance, repair and overhaul", International Journal of Quality & Reliability Management, 2020.

[2] S. U. Handayani, W. Mangestiyono, D. Ariwibowo, O. Haryadi, and I. Mujiarto, "Effect of Overhaul on Thermodynamic Performance of Gas Turbine Generator in Combined Cycle Powerplant", Advanced Science Letters, Vol. 24, No. 12, 2018, pp. 9800-9802.

[3] H. Sabouhi, M. Fotuhi-Firuzabad, and P. Dehghanian, "Identifying critical components of combined cycle power plants for implementation of reliability-centered maintenance", CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 2, No. 2, 2016, pp. 87-97.

[4] N. A. Shcherbakova, "Feasibility Analysis of Overhaul and Modernization of Equipment", In International Scientific Conference Far East Con (ISCFEC 2018), January 2019, pp. 1006-1010.

[5] C. M. F. Lapa, C. M. N. Pereira, and de M. P. Barros, "A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91, No. 2, 2006, pp. 233-240.

[6] W. R. W. Sulaiman, A. J. Adala, R. Junin, I. Ismail, A. R. Ismail, M. A. Hamid, and K. Kidam, "Effects of salinity on nanosilica applications in altering limestone rock wettability for enhanced oil recovery", In Advanced Materials Research, Vol. 1125, 2015, pp. 200-204. Trans Tech Publications Ltd.

[7] H. F. de Castro, and K. L. Cavalca, "Maintenance resources optimization applied to a manufacturing system", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91, No. 4, 2006, pp. 413-420.

[8] J. V. Taboada, V. Diaz-Casas, and X. Yu, "Reliability and Maintenance Management Analysis on Off Shore Wind Turbines (OWTs)", Energies, Vol. 14, No. 22, 2021, pp. 7662.

[9] A. A. Fattah, and A. Sudiarno, "Analysis of Changing Working Patterns on an Overhaul Activity in a Power Plant Industry using Lean Manufacturing Concept", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 598, No. 1, August 2019, p. 012072. IOP Publishing.

[10] E. Shayesteh, J. Yu, and P. Hilber, "Maintenance optimization of power systems with renewable energy sources integrated", Energy, Vol. 149, 2018, pp. 577-586.

[11] D. Piasson, A. A. Bíscaro, F. B. Leão, and J. R. S. Mantovani, "A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm", Electric Power Systems Research, Vol. 137, 2016, pp. 41-50.

[12] F. Zhang, and A. K. Jardine, "Optimal maintenance models with minimal repair, periodic overhaul and complete renewal", IIE transactions, Vol. 30, No. 12, 1998, pp. 1109-1119.

[13] A. Osyaev, A. Rauba, and A. Kosarev, "Algorithm of the target function of time between overhauls taking into account gradual and sudden failure of the locomotive equipment", In MATEC Web of Conferences, Vol. 239, 2018, p. 01029. EDP Sciences.

[14] E. Wahyu, and A. Wahjudi, "Optimization of Interval Between Overhaul on Steam Power Plant with Risk Based On Human Error and Profi", IPTEK Journal of Proceedings Series, Vol. 1, 2019, pp. 21-23.

[15] G. Pulcini, "On the overhaul effect for repairable mechanical units: A Bayes approach", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 70, No. 1, 2000, pp. 85-94.

[16] J. Saravanan, and J. J. Thakkar, "An integrated approach for lead time reduction of military aircraft major overhaul: A case of ABC Company", International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 35, 2018, pp. 2-33.

[17] B. Rašuo, and G. Đuknić, "Optimization of the aircraft general overhaul process", Aircraft engineering and aerospace technology, Vol. 85, No. 5, 2013, pp. 343-354.

[18] A. J. Da Silva, M. M. Bellinello, G. F. M. De Souza, A. C. Netto, C. A. Murad, and S. I. Nabeta, "Game theory supporting a decision-making process to reduce losses in hydro generating plants overhaul delays", Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2021, pp. 800–810.