

Introducing a Method for Optimizing Preventive Maintenance

(Document Type: Research Paper)

Naser Mollaverdi *

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology,
Isfahan, Iran, naserm@iut.ac.ir

Farhad Mousavi Zadegan

Department of Industrial Engineering, Lenjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan,
Iran, mousavizadeganf@gmail.com

Behnam Mahdinia

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology,
Isfahan, Iran, mahdinia.b@gmail.com

Purpose: Determining preventive maintenance intervals is critically significant from a variety of aspects, such as cost, reliability, and downtime. Currently, in many industries, such intervals are determined based on the viewpoints of experts and technicians or the manufacturer's recommendations in the manual. Determining an optimal interval, by the means of scientific methods, can have many effects in terms of costs, reliability, and downtime. For example, if the interval is assumed as very short, it can increase the cost of spare parts or manpower. Also, if the interval is too long, it increases the possibility of machine failure and downtime. For this purpose, organizations that apply the approach of time-based preventive maintenance should consider the above-mentioned criteria. However, such criteria are not compatible with each other, and each of them has its behavior. Therefore, given the existence of more than one criterion in this decision-making problem and the incompatibility of the criteria, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods seem appropriate for this purpose.

Design/methodology/approach: A component of a machine that is currently replaced periodically (and not necessarily at equal intervals) is considered for investigation. It is assumed that the failure distribution function of the component follows the Weibull distribution. First, using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) technique, new and more general equations are presented to estimate the parameters of the failure distribution function. Subsequently, three important criteria are taken into account, including reliability, cost, and downtime due to failure and preventive replacement.. Given the existence of several criteria with different behaviors, as well as the vague or linguistic nature of human judgments, a hybrid MCDM model including Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Viekriterijumsko kompromisno rangiranje (VIKOR) is proposed.

Findings: To indicate the applicability of the proposed model, a real case was investigated in the Isfahan Steel Company. For this purpose, a circuit breaker switch of a compressor in the oxygen workshop was studied. The component was replaced at about a 200 days interval. After implementing the FAHP method, it was found that the reliability criterion was more important than the other two

* Corresponding author

Copyright © 2021, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

criteria. This is due to the high sensitivity of this component and the consequences of its failure. After Performing the VIKOR method, the set of top alternatives included replacement intervals between 50 and 90 days. It confirms that the importance of the reliability criterion, and the replacement interval, should be reduced by at least a half. Based on the results, reliability was expected to improve by 2.6% and the cost and downtime criteria to improve by 33.7% and 28.6%, respectively.

Research limitations/implications: To implement the proposed method for each component, the following data are required:

- i) Preventive maintenance and breakdown records of the component
- ii) Cost and downtime of the machine due to breakdown and preventive maintenance
- iii) Three pairwise comparisons to implement the FAHP method

If information systems exist in the relevant plant, the data for items 1 and 2 are available and do not constitute a constraint on the proposed model. The only limitation of this model is the inputs of the FAHP method for which, implementing the model depends on the humans. Doing three pairwise comparisons for each component may seem a bit difficult and time-consuming. Consequently, the removal of this limitation can be proposed as a suggestion for the development of this study. Other calculations of this model can be done automatically. Also, the study of other probability distribution functions such as gamma and lognormal can be effective in improving the results of this study.

Originality/value: To the best of our knowledge, the fuzzy AHP or VIKOR method has not been used to address the subject of this study, even independently. In addition, unlike previous studies, the proposed model was implemented for a component that was undergoing preventive maintenance. In other words, in most of the data collected the component was replaced before failure, which made it impossible to:

- i) Discover the component failure distribution function by data fitting. As a result, it can be assumed that the failure distribution follows the Weibull distribution.
- ii) Applying the existing equations to estimate the parameters of the failure distribution function. As a result, new equations can be proposed by implementing the MLE technique.

Keywords: Preventive maintenance, Maximum Likelihood Estimation, Weibull distribution, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), FAHP, VIKOR

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

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷

صص: ۱۱۷-۱۳۷ (نوع مقاله: پژوهشی)

ارائه روشی برای بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

ناصر ملاوردی^{۱*}، فرهاد موسوی زادگان^۲، بهنام مهدی نیا^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، naserm@cc.iut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سده لنگان، اصفهان، ایران، mousavizadeganf@gmail.com

۳- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، mahdinia.b@gmail.com

چکیده: معمولاً در صنایع، فواصل نگهداری پیشگیرانه براساس تجربه یا توصیه‌های سازنده دستگاه تعیین می‌شود. تعیین دقیق و علمی فواصل زمانی، نقش بسزایی در افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های خرابی، کاهش هزینه‌های قطعات یدکی، کاهش زمان ازکارافتادگی دستگاه و غیره دارد. در این مقاله، این موضوع، مطالعه و مدل جدیدی ارائه شده است؛ به عبارت دقیق‌تر، ماشینی مد نظر قرار گرفت که قطعه مهمی از آن در حال حاضر به صورت دوره‌ای و نه الزاماً در فواصل زمانی ثابت تعویض می‌شود. فرض شد تابع خرابی قطعه مربوط از توزیع وایبول تبعیت می‌کند. درابتدا، با استفاده از روش برآورد درست‌نمایی پیشینه، معادلات جدیدی برای تخمین پارامترهای عملکرد توزیع خرابی ارائه شده است؛ سپس، معیارهای قابلیت اطمینان، هزینه خرابی و تعویض پیشگیرانه و مدت‌زمان ازکارافتادگی دستگاه (در اثر خرابی و تعویض قطعه) به عنوان اهداف تصمیم‌گیری محاسبه شد. با توجه به وجود چندین معیار با رفتارهای مختلف و ماهیت مبهم قضاوت‌های انسانی، یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی شامل FAHP و VIKOR پیشنهاد شده است. برای نشان دادن قابلیت مدل پیشنهادی، مسئله‌ای واقعی در شرکت ذوب آهن اصفهان بررسی شده است. برای کلید دژنکتور یکی از تجهیزات این شرکت، که برنامه تعویض آن به صورت شش ماهه است، این نتیجه حاصل شد که برنامه تعویض فعلی این قطعه باید حداقل به نصف کاهش یابد.

واژه‌های کلیدی: نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، برآورد درست‌نمایی پیشینه، توزیع وایبول، تصمیم‌گیری چندمعیاره

۱- مقدمه

در گذشته، نگهداری و تعمیرات (نت) به عنوان کار تعمیراتی در نظر گرفته می شد. ماشین آلات عمل می کردند تا زمانی که خراب می شدند و هیچ کوششی برای پیش بینی خرابی انجام نمی شد. به این رویکرد، نت پس از خرابی^۱ یا نت کار تا خرابی^۲ یا نت اصلاحی^۳ گفته می شود. با توسعه مهندسی قابلیت اطمینان در دهه ۱۹۵۰، مفهوم نت پیشگیرانه ارائه شد (تاکاتا^۴ و همکاران، ۲۰۰۴). نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شامل مجموعه فعالیت ها و روش های منظم و دوره ای است که برای بررسی وضعیت موجود، به روزرسانی و حفظ تجهیزات در شرایط مطلوب انجام می شود (امون، نورمن و مورفی، ۲۰۱۶).

تعیین فواصل زمانی بین فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه روی دستگاه ها از جنبه های مختلفی مانند هزینه، زمان از کارافتادگی دستگاه و قابلیت اطمینان دستگاه، اهمیت بسیاری دارد. در حال حاضر، در بسیاری از صنایع، فواصل زمانی بین فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه براساس خبرگی و نظر افراد اهل فن یا توصیه های سازنده دستگاه در دفترچه راهنمای آن تعیین می شود. تعیین یک فاصله زمانی بهینه به کمک روش های علمی برای انجام دادن فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، تأثیرات زیادی از لحاظ کاهش هزینه ها، افزایش قابلیت اطمینان دستگاه، کاهش زمان از کارافتادگی دستگاه و ... برای یک صنعت دارد؛ به عنوان مثال، در صورتی که این فواصل، خیلی کوتاه در نظر گرفته شود، می تواند باعث افزایش هزینه های قطعات یدکی یا نیروی انسانی نت شود. همچنین، در صورتی که این فواصل، خیلی بلند باشند، امکان خرابی دستگاه و افزایش هزینه های ناشی از خرابی وجود دارد (ابراهیم پور و همکاران، ۲۰۱۵).

در نت پیشگیرانه براساس زمان، یکی از مدل های مهم، مدل تعویض / جایگزینی قطعات است که در مبانی نظری این موضوع نیز به آن توجه بسیاری شده است. برای درک بهتر این مدل به عنوان مثال به اتصالات الکتریکی می توان اشاره کرد که قطعات خراب به سرعت با قطعه مشابه جدیدی جایگزین می شود. مدل تعویض قطعات نیز خود به دو دسته ۱- تعویض قطعات براساس عمر (AR^6) و ۲- تعویض قطعات بلوکی (BR^7) تقسیم می شود. تعویض قطعات براساس عمر، یعنی قطعه یا در زمان رخداد خرابی یا زمانی که به اندازه ای معین عمر کند، براساس اینکه کدام زودتر اتفاق بیفتد، تعویض می شود. در حالت تعویض قطعات بلوکی، قطعه در زمان رخداد خرابی و در فواصل زمانی ثابت (بدون توجه به عمر کارکرد قطعه) تعویض می شود (امون، نورمن و مورفی، ۲۰۱۶).

هوانگ، میلر و اُگوگبا^۸ (۱۹۹۵) مدل تعیین فواصل زمانی تعویض قطعات AR را با توزیع خرابی وایبول در نظر گرفتند. هدف اصلی آنها در این مدل، تعیین سن تعویض قطعات براساس تابع هزینه مورد انتظار بر واحد زمان بوده است. بهرامی، پرایس و متیو^۹ (۲۰۰۰) یک مدل تعیین فواصل ثابت تعویض قطعات BR را در نظر گرفتند که در آن، دستگاه، نرخ خرابی افزایشی را تجربه کرده و هدف، کاهش زمان از کارافتادگی دستگاه است. فرضیه اصلی آنها در حل این مدل این است که زمانی که قطعه در اواخر عمر خود، یعنی دوره فرسودگی قرار دارد، بهترین زمان برای جایگزینی پیشگیرانه قطعه است که زمان از کارافتادگی دستگاه را کمینه می کند. آنها برای بررسی کاربردپذیری مدل، پیشنهادی را روی خط تولید میل لنگ یک کارخانه خودروسازی اجرا کرده اند. چاریونسوک، ناگارور و تابوکانون^{۱۰} (۱۹۹۷) یک روش PROMETHEE II را برای انتخاب فواصل نت پیشگیرانه AR با در نظر گرفتن معیارهای هزینه و قابلیت اطمینان ارائه دادند. آنها منطق هوانگ، میلر و اُگوگبا (۱۹۹۵) را برای هزینه های نت

اصلاحی و نت پیشگیرانه به کار گرفتند. براساس این منطق در مواردی که داده کافی درباره هزینه‌های نگهداری و تعمیرات موجود نباشد، از نسبت این هزینه‌ها نیز می‌توان استفاده کرد. کاوالکانتیه و د'آلمیدا^{۱۱} (۲۰۰۷) مدلی برای تصمیم‌گیری درباره فواصل زمانی نت پیشگیرانه AR براساس روش PROMETHEE III با در نظر گرفتن دو معیار تصمیم‌گیری هزینه و قابلیت اطمینان ارائه دادند. همچنین، آنها عدم قطعیت در داده‌های خرابی تجهیزات را نیز در مدل خود وارد کرده و برای غلبه بر آن از رویکرد بیزی بهره گرفته‌اند. فریرا، د'آلمیدا و کاوالکانتیه^{۱۲} (۲۰۰۹) مدلی برای تعیین فواصل بازرسی در نت پیشگیرانه براساس شرایط، با در نظر گرفتن دو معیار هزینه و زمان از کارافتادگی دستگاه، با فرض وجود زمان تأخیر خرابی ارائه دادند. در مدل پیشنهادی آنها از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MAUT استفاده شده است. زمان تأخیر خرابی، یعنی نشانه‌های خرابی از یک لحظه مشخص در عمر دستگاه قابل دریافت است و از آن زمان مدتی طول می‌کشد تا دستگاه از کار بیفتد. کاوالکانتیه، فریرا و د'آلمیدا^{۱۳} (۲۰۱۰) مدلی ترکیبی براساس روش PROMETHEE II و تکنیک بیزی پیشنهاد دادند. آنها دو معیار هزینه و زمان از کارافتادگی دستگاه را برای تعیین سن تعویض قطعات در سیاست AR، با فرض وجود عدم قطعیت در داده‌های خرابی در نظر گرفته‌اند. فقیهی‌نیا و ملاوردی^{۱۴} (۲۰۱۲) مسئله تعیین فواصل زمانی تعویض قطعات (AR) را با در نظر گرفتن اهداف افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌های نت و کاهش زمان از کارافتادگی دستگاه حل کرده‌اند. آنها از رویکرد بیزی برای مقابله با کمبودهای موجود در داده‌های نت استفاده کرده و با روش PROMETHEE II گزینه‌های فواصل زمانی تعویض قطعات را ارزیابی و رتبه‌بندی کرده‌اند. درنهایت، با یک مثال عددی فرضی، کاربرد مدل خود را نشان داده و برای تحلیل حساسیت آن از روش PROMETHEE GAIA^{۱۵} استفاده کرده‌اند. آزاده^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۳) به کمک تکنیک شبیه‌سازی، مسئله تعیین فواصل زمانی بین فعالیت‌های نت پیشگیرانه را حل کرده‌اند. آنها از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره DEA^{۱۷} برای ارزیابی و انتخاب بهترین سناریو بهره گرفته‌اند. اموون، نورمن و مورفی (۲۰۱۶a) مدلی برای تعیین فواصل زمانی تعویض قطعات در سیاست AR در صنعت دریایی ارائه کردند. آنها نیز برای دستیابی به فواصل زمانی بهینه تعویض قطعات، سه معیار تصمیم‌گیری ۱- هزینه، ۲- زمان از کارافتادگی و ۳- قابلیت اطمینان را در نظر گرفتند. در مدل پیشنهادی، آنها ابتدا از روش AHP سستی و روش واریانس آماری برای وزن‌دهی به معیارها استفاده کردند و پس از آن با استفاده از روش TOPSIS، گزینه‌های تصمیم‌گیری را اولویت‌بندی و بدین‌وسیله فاصله زمانی بهینه تعویض میله اتصال موتور اصلی یک سیستم دریایی را تعیین کردند. اموون، نورمن و مورفی (۲۰۱۶b) فواصل بازرسی را برای صنعت دریایی با فرض وجود مدت‌زمان تأخیر تعیین کردند. آنها سه معیار هزینه، زمان از کارافتادگی دستگاه و شهرت شرکت را در مدل خود وارد و با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره MAUT و ELECTRE^{۱۸} مسئله را حل و جواب حاصل از این دو روش را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند.

کرباسیان، قندهاری و عابدی^{۱۹} (۱۳۸۹) مدل ریاضی چندهدفه‌ای ارائه کرده‌اند که بین قابلیت اطمینان سیستم و هزینه‌های مکان‌یابی - نگهداری و تعمیرات سیستم، موازنه برقرار می‌کند. اسماعیلیان، جعفرنژاد و جبلی^{۲۰} (۱۳۹۲) نیز برای کاهش توقفات و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان، روشی ابتکاری برای زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه پیشنهاد کرده‌اند.

براساس پژوهش‌های انجام‌شده در هیچ مطالعه‌ای از روش AHP فازی یا VIKOR برای بررسی این موضوع، حتی به صورت مستقل استفاده نشده است. در این پژوهش قصد بر این است که با ترکیب روش‌های AHP فازی و VIKOR مسئله جایگزینی قطعات با سیاست AR حل شود. در ادامه، علت انتخاب و ترکیب این دو روش شرح داده شده است.

یکی از مزیت‌های روش AHP این است که با تهیه یک ساختار برای مسئله باعث فراهم شدن شرایط تجزیه و تحلیل بهتر مسئله می‌شود. البته یکی از ضعف‌های این روش، زوجی بودن مقایسات است که باعث می‌شود در مسائلی که تعداد معیارها زیاد است، تعداد مقایسات به صورت تصاعدی افزایش یابد. این امر می‌تواند باعث کاهش دقت این روش نیز شود. البته در مسئله این پژوهش، تعداد معیارها کم است؛ بنابراین، این ضعف روی مدل پیشنهادی تأثیر ندارد. همچنین، با توجه به ماهیت مبهم قضاوت‌های انسانی، ترکیب روش AHP با منطق فازی می‌تواند در دقیق‌تر شدن نتیجه این روش، تأثیر مثبت داشته باشد.

ازجمله مزیت‌های روش VIKOR به کم بودن تعداد محاسبات آن نسبت به روش AHP می‌توان اشاره کرد. همچنین، در صورتی که وزن معیارها مشخص باشد (که در مدل پیشنهادی این پژوهش به کمک روش AHP فازی تعیین می‌شود) تمامی محاسبات این روش را به صورت خودکار می‌توان انجام داد. ازجمله مزایای دیگر این روش به این امر می‌توان اشاره کرد که روش VIKOR برخلاف روش TOPSIS (در مقایسه با مطالعه اموون و همکاران، ۲۰۱۶a) یک گزینه را به صورت سختگیرانه به عنوان بهینه انتخاب نمی‌کند. در واقع، اگر اختلاف معناداری بین گزینه برتر با سایر گزینه‌ها وجود داشته باشد، آن گزینه به عنوان نتیجه تصمیم‌گیری معرفی می‌شود و در غیر این صورت، چندین گزینه، که اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد، همگی به عنوان مجموعه گزینه‌های برتر مشخص می‌شود. همچنین، در این پژوهش، معیارهای تصمیم‌گیری که بیشترین استفاده و محبوبیت را در بین پژوهشگران این زمینه داشته است (هزینه، زمان از کارافتادگی و قابلیت اطمینان)، به عنوان معیارهای نهایی تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است.

از دیگر جنبه‌های نوآوری این پژوهش به این موضوع می‌توان اشاره کرد که برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین (ازجمله مطالعه اموون و همکاران، ۲۰۱۶a)، مدل پیشنهادی برای قطعه‌ای طراحی شده که قبلاً روش نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای آن به کار می‌رفته است و در واقع، هدف این پژوهش، بهینه‌سازی فاصله نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه این قطعه است؛ به عبارت دیگر، در بیشتر داده‌های جمع‌آوری شده، قطعه پیش از خرابی تعویض شده است که این امر باعث می‌شود که نتوان

۱) با برازش داده‌ها تابع توزیع خرابی قطعه را کشف کرد که در نتیجه، فرض شده است احتمال خرابی قطعه از توزیع وایبول تبعیت می‌کند و

۲) برای تخمین پارامترهای تابع توزیع خرابی قطعه از روابط و معادلات موجود استفاده کرد که در نتیجه، به کارگیری روش برآورد درست‌نمایی بیشینه^{۲۱} معادلات جدیدی برای این منظور ارائه شده است.

در ادامه، تعریف مسئله به همراه فرضیات آن به صورت خلاصه و دقیق آورده شده است:

- یک ماشین وجود دارد که روی آن، سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه انجام می‌شود؛
- یکی از قطعات مهم این ماشین، در حال حاضر به صورت دوره‌ای تعویض می‌شود؛

- قطعه جدیدی که جایگزین می‌شود، کاملاً با قطعه قبلی مشابه است؛
- احتمال خرابی قطعه مد نظر در طول زمان از توزیع وایبول تبعیت می‌کند؛
- هدف، تعیین مقدار مناسب فاصله زمانی تعویض قطعه است که با T_{PI} نشان داده می‌شود.
- سه معیار ذیل در دستیابی به این هدف تأثیرگذار است:
 - افزایش قابلیت اطمینان ماشین؛
 - کاهش هزینه‌ها شامل هزینه‌های فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و خرابی ماشین و
 - کاهش زمان ازکارافتادگی ماشین در اثر فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و خرابی ماشین
- در ادامه، تعداد معیارها با M نمایش داده می‌شود که بالطبع در این پژوهش $M = 3$ است.
- گزینه‌های ممکن برای مقادیر t_{PI} یک مجموعه گسسته شامل N عضو را تشکیل می‌دهد. این مجموعه به صورت $A = \{A_i = T_{PI}^i | i = 1, 2, \dots, N\}$ نشان داده می‌شود.

۲- روش پژوهش

۱-۲ تخمین پارامترها

در این پژوهش برای مدل‌سازی رفتار خرابی قطعه، از توزیع وایبول با ۲ پارامتر بهره گرفته شده است. تابع چگالی این توزیع در ذیل آورده شده است:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

که در آن، $f(t)$ نشان‌دهنده احتمال شکست در زمان $t \geq 0$ و $\beta > 0$ و $\alpha > 0$ پارامترهای شکل و مقیاس این توزیع است که به ترتیب بر شکل و میزان گسترش توزیع اثر می‌گذارد.

قطعه مد نظر، در حال حاضر در فاصله زمانی غیرثابت تعویض می‌شود. فرض کنید این قطعه پس از گذشت مدت زمان y (از آخرین تعویض قطعه یا خرابی) در اثر خرابی از کار بیفتد؛ بنابراین، احتمال این خرابی به صورت ذیل است:

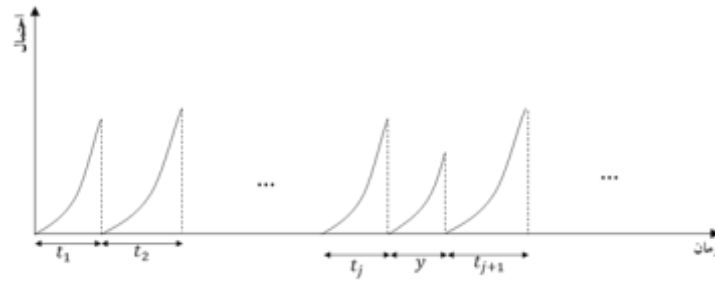
$$f(y) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{y}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{y}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2)$$

در حالتی دیگر، فرض کنید قطعه تا زمان تعویض بعدی خراب نشود. در این حالت، قطعه حداقل به اندازه زمان گذشته تا تعویض بعدی عمر کرده است که این مقدار، برابر t_r فرض می‌شود. احتمال اینکه یک قطعه بیشتر از یک زمان مشخص عمر کند، به عنوان قابلیت اطمینان شناخته می‌شود. تابع قابلیت اطمینان توزیع وایبول به صورت ذیل است:

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3)$$

در نتیجه، احتمال این حالت نیز به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$f(t > t_r) = e^{-\left(\frac{t_r}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4)$$



شکل ۱- احتمال از کار افتادن دستگاه در اثر خرابی قطعه

در این پژوهش از روش MLE برای برآورد پارامترهای تابع خرابی قطعه بهره گرفته شده است. برای اجرای این تکنیک برای این مسئله فرض کنید n داده جمع‌آوری شده است. در این داده‌ها قطعه u بار خراب شده و هر بار پیش از خرابی به مدت y_i ($i = 1, 2, \dots, u$) عمر کرده است. به همین ترتیب، قطعه k بار ($k = n - u$) بدون خراب شدن با گذراندن عمر t_j ($j = 1, 2, \dots, k$) تعویض شده است؛ در نتیجه، تابع درست‌نمایی این نمونه را به صورت ذیل می‌توان نشان داد:

$$L(\alpha, \beta; t_1, t_2, \dots, t_k, y_1, y_2, \dots, y_u) = e^{-\sum_{j=1}^k \left(\frac{t_j}{\alpha}\right)^\beta} \prod_{i=1}^u \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{y_i}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{y_i}{\alpha}\right)^\beta} \quad (5)$$

با ساده کردن رابطه مذکور، رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$L(\alpha, \beta; t_1, t_2, \dots, t_k, y_1, y_2, \dots, y_u) = e^{-\sum_{j=1}^k \left(\frac{t_j}{\alpha}\right)^\beta} \frac{\beta^u}{\alpha^u \beta} e^{-\sum_{i=1}^u \left(\frac{y_i}{\alpha}\right)^\beta} \prod_{i=1}^u y_i^{\beta-1} \quad (6)$$

لگاریتم طبیعی تابع درست‌نمایی مذکور، به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\ln L(\alpha, \beta; t_1, t_2, \dots, t_k, y_1, y_2, \dots, y_u) = -\sum_{j=1}^k \left(\frac{t_j}{\alpha}\right)^\beta + u \ln \beta - u \beta \ln \alpha - \sum_{i=1}^u \left(\frac{y_i}{\alpha}\right)^\beta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^u \ln y_i \quad (7)$$

حال برای حداکثرسازی تابع درست‌نمایی، مشتق‌های جزئی آن محاسبه و برابر صفر قرار داده می‌شود.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \beta \sum_{j=1}^k \frac{t_j^\beta}{\alpha^{\beta+1}} - \frac{u\beta}{\alpha} + \beta \sum_{i=1}^u \frac{y_i^\beta}{\alpha^{\beta+1}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta} = \frac{\ln \alpha}{\alpha^\beta} \sum_{j=1}^k t_j^\beta - \frac{1}{\alpha^\beta} \sum_{j=1}^k t_j^\beta \ln t_j + \frac{u}{\beta} - u \ln \alpha + \frac{\ln \alpha}{\alpha^\beta} \sum_{i=1}^u y_i^\beta - \frac{1}{\alpha^\beta} \sum_{i=1}^u y_i^\beta \ln y_i + \sum_{i=1}^u \ln y_i = 0 \quad (9)$$

با ساده‌سازی رابطه شماره (۸)، رابطه ذیل حاصل می‌شود:

$$\frac{\beta}{\alpha^{\beta+1}} (\sum_{j=1}^k t_j^\beta + \sum_{i=1}^u y_i^\beta) = \frac{u\beta}{\alpha} \quad (10)$$

در نتیجه، پارامتر α را به صورت ذیل می‌توان تخمین زد:

$$\hat{\alpha} = \sqrt[\beta]{\frac{\sum_{j=1}^k t_j^\beta + \sum_{i=1}^u y_i^\beta}{u}} \quad (11)$$

با جایگذاری $\hat{\alpha}$ در رابطه شماره (۹) رابطه‌ای برای تخمین پارامتر β نیز می‌توان به دست آورد:

$$\begin{aligned} & \frac{u \ln \left(\frac{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}}}{u} \right)}{\hat{\beta} \left(\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}} \right)} \sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} - \frac{u}{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}}} \sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} \ln t_j + \frac{u}{\hat{\beta}} - \frac{u}{\hat{\beta}} \ln \left(\frac{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}}}{u} \right) + \\ & \frac{u \ln \left(\frac{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}}}{u} \right)}{\hat{\beta} \left(\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}} \right)} \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}} - \frac{u}{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}}} \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}} \ln y_i + \sum_{i=1}^u \ln y_i = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

با ساده‌سازی رابطه مذکور، به رابطه ذیل برای تخمین پارامتر β می‌توان رسید:

$$\frac{1}{\hat{\beta}} + \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u \ln y_i - \frac{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} \ln t_j + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}} \ln y_i}{\sum_{j=1}^k t_j^{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^u y_i^{\hat{\beta}}} = 0 \quad (13)$$

رابطه شماره (۱۳) را باید به کمک روش‌های عددی حل کرد. در این پژوهش، از روش نیوتن-رافسون (اکرم و اولان^{۲۲}، ۲۰۱۵) برای این منظور استفاده می‌شود. پس از محاسبه $\hat{\beta}$ با جایگذاری مقدار آن در رابطه شماره (۱۱) مقدار $\hat{\alpha}$ نیز قابل محاسبه است.

۲-۲- معیارهای تصمیم‌گیری

۲-۲-۱- قابلیت اطمینان

این معیار در این پژوهش به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - F(t) \quad (14)$$

که در آن، $R(t)$ و $F(t)$ به ترتیب، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان ماشین و احتمال تجمعی خرابی قطعه است؛ بنابراین، اگر فاصله زمانی دوره‌های انجام‌دادن فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برابر t_{PI} در نظر گرفته شود، معیار قابلیت اطمینان ماشین به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$R(t_{PI}) = \int_{t_{PI}}^{\infty} f(t) dt \quad (15)$$

۲-۲-۲- هزینه

تابع هزینه برحسب واحد زمان، براساس هزینه انجام‌دادن فعالیت نت پیشگیرانه روی ماشین و هزینه خرابی ماشین با در نظر گرفتن احتمال خرابی ماشین، به صورت ذیل محاسبه می‌شود (ژاردین و تسانگ^{۲۳}، ۲۰۱۳).

$$C(t_{PI}) = \frac{C_f F(t_{PI}) + C_P R(t_{PI})}{\left(\int_0^{t_{PI}} t f(t) dt + T_f F(t_{PI}) \right) + \left((t_{PI} + T_P) R(t_{PI}) \right)} \quad (16)$$

که در آن:

C_f : هزینه تعمیر ماشین در صورت خرابی قطعه؛

C_P : هزینه انجام‌دادن فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه روی قطعه؛

T_f : مدت زمان لازم برای تعمیر ماشین در صورت خرابی قطعه و

T_p : مدت زمان لازم برای انجام دادن فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه روی قطعه است.

در صورت رابطه شماره (۱۶)، هزینه کلی سیستم در هر دوره زمانی انجام دادن فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، محاسبه شده است. به صورت دقیق تر، در صورتی که قطعه در طول زمان t_{PI} خراب شود (با احتمال $F(t_{PI})$)، سیستم هزینه G_f را متحمل و در غیر این صورت (با احتمال $R(t_{PI})$) سیستم با هزینه C_p مواجه می شود. به همین ترتیب در مخرج کسر نیز مدت زمان هر دوره محاسبه شده است. در صورتی که قطعه در طول زمان t_{PI} خراب شود، کل مدت زمان دوره برابر با میانگین مدت زمان عمر دستگاه پیش از t_{PI} به علاوه مدت زمان لازم برای تعمیر ماشین است و در غیر این صورت، مدت زمان دوره، برابر t_{PI} به علاوه مدت زمان لازم برای انجام دادن فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است.

۲-۲-۳- زمان از کار افتادگی ماشین

زمان از کار افتادگی ماشین در هر دوره بر حسب واحد زمان نیز مشابه بخش قبلی به صورت ذیل محاسبه می شود (ژاردین و تسانگ، ۲۰۱۳):

$$D(t_{PI}) = \frac{T_f F(t_{PI}) + T_p R(t_{PI})}{\left(\int_0^{t_{PI}} t f(t) + T_f F(t_{PI})\right) + (T_p + t_{PI}) R(t_{PI})} \quad (17)$$

۲-۲-۳- روش AHP فازی

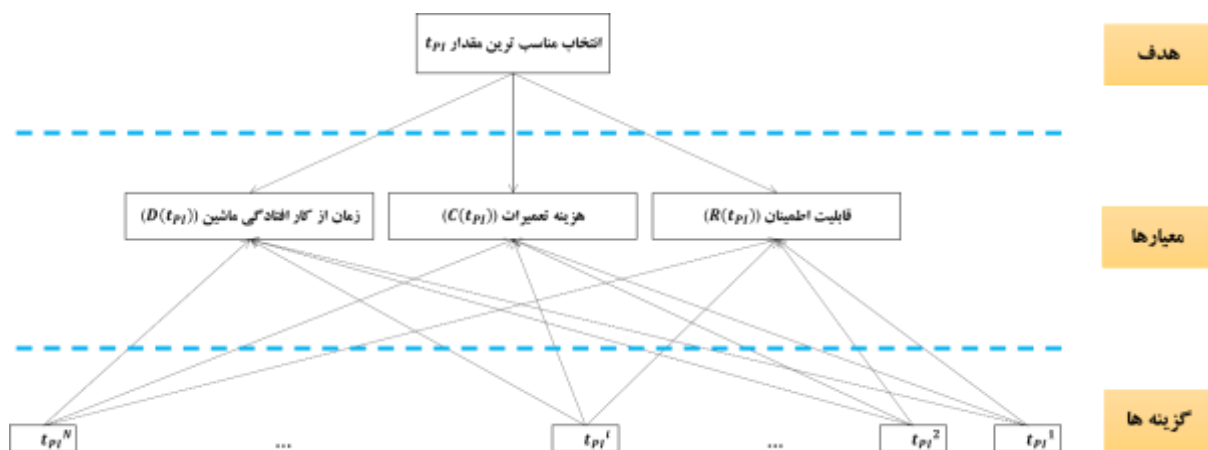
روش AHP فازی در واقع، بسط روش AHP با ترکیب آن با منطق فازی است. مراحل انجام دادن این روش، مشابه روش AHP است؛ با این تفاوت که به جای اعداد قطعی از نسبت های فازی در ماتریس تصمیم گیری استفاده می شود. یکی از رایج ترین شکل های نمایش اعداد فازی، شکل مثلثی است. یک عدد فازی مثلثی به صورت $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in R\}$ نمایش داده می شود که در آن، $\mu_{\tilde{A}}(x)$ نگاشت عدد حقیقی x روی بازه $[0, 1]$ است و به آن، تابع عضویت نیز می گویند. عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ را به صورت (l, m, u) نیز نمایش می دهند. در این صورت، تابع عضویت عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ به صورت ذیل است (کیروباکاران و یلانگوماران^{۲۴}، ۲۰۱۶):

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < l \\ \frac{x-l}{m-l} & l < x < m \\ \frac{u-x}{u-m} & m < x < u \\ 0 & x > u \end{cases} \quad (18)$$

مراحل انجام دادن روش AHP فازی در این پژوهش در ادامه آورده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در مدل طراحی شده در این پژوهش، از روش AHP فازی فقط برای به دست آوردن وزن معیارها استفاده می شود (دورن^{۲۵}، ۲۰۱۱).

۲-۳-۱- تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی مسئله

در ساختار سلسله‌مراتبی مسئله این پژوهش، که در شکل ۲ نشان داده شده است، سه سطح وجود دارد. سطح اول، نشان‌دهنده هدف مسئله، یعنی انتخاب مناسب‌ترین مقدار t_{PI} است. در سطح دوم، سه معیار این تصمیم‌گیری آورده شده است. گزینه‌های این تصمیم‌گیری نیز مجموعه اعداد قابل قبول برای t_{PI} است که در سطح سوم نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختار سلسله‌مراتبی مسئله این پژوهش

۲-۳-۲- تشکیل ماتریس مقایسات زوجی معیارها

در روش AHP فازای عناصر ماتریس مقایسات زوجی معیارها، اعداد فازای مثلثی است. در روش AHP سستی برای دریافت نظرات خبرگان از مقیاس ۹ درجه‌ای استفاده می‌شود (کیروباکاران و یلانگکوماران، ۲۰۱۶). این مقیاس به صورت ذیل است:

جدول ۱- مقیاس ۹ درجه‌ای فازای برای دریافت نظرات خبرگان

ارزش	تعریف	معادل فازای مثلثی	معکوس فازای مثلثی
۱	ترجیح یکسان	(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)
۲	بینابین	(۱، ۲، ۳)	(۰/۳۳۳، ۰/۵، ۱)
۳	کمی بهتر	(۲، ۳، ۴)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)
۴	بینابین	(۳، ۴، ۵)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)
۵	بهتر	(۴، ۵، ۶)	(۰/۱۶۶، ۰/۲، ۰/۲۵)
۶	بینابین	(۵، ۶، ۷)	(۰/۱۴۲، ۰/۱۶۶، ۰/۲)
۷	خیلی بهتر	(۶، ۷، ۸)	(۰/۱۲۵، ۰/۱۴۲، ۰/۱۶۶)
۸	بینابین	(۷، ۸، ۹)	(۰/۱۱۱، ۰/۱۲۵، ۰/۱۴۲)
۹	کاملاً بهتر	(۹، ۹، ۹)	(۰/۱۱۱، ۰/۱۱۱، ۰/۱۱۱)

حال باید ماتریس مقایسات زوجی حاصل از دیدگاه خبرگان درباره معیارها فراهم شود. هدف از این کار، محاسبه وزن معیارهای تصمیم‌گیری است. نتیجه مقایسات زوجی معیارها، یک ماتریس $M \times M$ (تعداد معیارهاست) به صورت ذیل است:

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{b}_{11} & \tilde{b}_{12} & \dots & \tilde{b}_{1M} \\ \tilde{b}_{21} & \tilde{b}_{22} & \dots & \tilde{b}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{b}_{M1} & \tilde{b}_{M2} & \dots & \tilde{b}_{MM} \end{bmatrix}, \quad \tilde{b}_{ii} = 1, \quad \tilde{b}_{ij} = 1/\tilde{b}_{ji}, \quad b_{ij} \neq 0 \quad (19)$$

اگر بیشتر از یک کارشناس وجود دارد، باید از میانگین هندسی برای تجميع دیدگاه‌های آنها استفاده شود. معمولاً وقتی اعداد به صورت درصد یا نسبت باشد، از میانگین هندسی استفاده می‌شود.

۲-۳-۳- نرمال‌سازی ماتریس مقایسات زوجی معیارها

در این مرحله باید ماتریس مقایسات زوجی معیارها نرمال‌سازی شود. برای انجام دادن این کار، ابتدا میانگین هندسی هر سطر محاسبه می‌شود.

$$\tilde{v}_i = (\prod_{j=1}^M \tilde{b}_{ij})^{1/M} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (20)$$

گفتنی است با توجه به اینکه اعداد ماتریس $\tilde{B}$ فازی است، تمامی اعمال ریاضی براساس قواعد فازی روی آنها انجام می‌شود. در مرحله بعد، میانگین‌های هندسی به دست آمده نرمال‌سازی می‌شود.

$$\tilde{w}_i = \tilde{v}_i \oslash \sum \tilde{v}_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (21)$$

مقادیر فازی نرمال شده $\tilde{w}_i$ نشان‌دهنده اهمیت نسبی معیارها (وزن معیارها) است که در این پژوهش از آنها در اجرای روش VIKOR استفاده می‌شود. البته بدین منظور باید ابتدا برای هر یک از این اعداد فازی، یک نماینده قطعی محاسبه کرد. در این پژوهش، نماینده قطعی عدد فازی $\tilde{A} = (l, m, u)$ به صورت ذیل محاسبه می‌شود (دورن، ۲۰۱۱):

$$\hat{A} = \frac{l+2m+u}{4} \quad (22)$$

که در آن، $\hat{A}$ نشان‌دهنده نماینده قطعی عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ است.

۲-۳-۴- محاسبه کیفیت خروجی روش AHP فازی

کیفیت خروجی روش AHP فازی به طور مستقیم به ثبات مقایسات زوجی بستگی دارد. برای محاسبه کیفیت خروجی روش AHP فازی ابتدا باید مقادیر ویژه ماتریس مقایسات زوجی معیارها را با توجه به رابطه ذیل به دست آورد:

$$\begin{bmatrix} \tilde{b}_{11} \otimes \tilde{w}_1 + \tilde{b}_{12} \otimes \tilde{w}_2 + \dots + \tilde{b}_{1M} \otimes \tilde{w}_M \\ \tilde{b}_{21} \otimes \tilde{w}_1 + \tilde{b}_{22} \otimes \tilde{w}_2 + \dots + \tilde{b}_{2M} \otimes \tilde{w}_M \\ \vdots \\ \tilde{b}_{M1} \otimes \tilde{w}_1 + \tilde{b}_{M2} \otimes \tilde{w}_2 + \dots + \tilde{b}_{MM} \otimes \tilde{w}_M \end{bmatrix} = \lambda_{max} \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 \\ \tilde{w}_2 \\ \vdots \\ \tilde{w}_M \end{bmatrix} \quad (23)$$

که در آن، λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسات زوجی معیارهاست. حال، نرخ ثبات $(CR)^{26}$ براساس رابطه ذیل قابل محاسبه است. شاخص CR نشان‌دهنده کیفیت خروجی روش AHP فازی است و در صورتی که مقدار آن کمتر از ۰/۱ باشد، یعنی مقایسات زوجی انجام‌شده، قابل قبول است و ثبات کافی دارد.

$$CR = \frac{\lambda_{max} - M}{RCI(M-1)} \quad (24)$$

در رابطه مذکور، RCI^{27} نشان‌دهنده شاخص ثبات تصادفی است. شاخص ثبات تصادفی براساس میانگین نتایج تعداد بسیار زیادی شبیه‌سازی با مقادیر تصادفی به دست آمده است. مقادیر این شاخص برحسب بعد ماتریس مقایسات زوجی از جدول ذیل استخراج می‌شود:

جدول ۲- مقادیر RCI برحسب بعد ماتریس مقایسات زوجی

بعد ماتریس مقایسات زوجی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RCI	۰	۰	۰/۵۲	۰/۸۹	۱/۱۱	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۴	۱/۴۵	۱/۴۹

با توجه به تعداد معیارهای این پژوهش، مقدار RCI مورد استفاده برابر ۰/۵۲ خواهد بود.

۲-۴-۲ روش VIKOR

در مدل VIKOR همواره چند گزینه مختلف وجود دارد که این گزینه‌ها براساس چند معیار متضاد به صورت مستقل ارزیابی و در نهایت، گزینه‌ها براساس ارزش، رتبه‌بندی می‌شود. تفاوت اصلی این مدل با مدل‌های تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی یا شبکه‌ای این است که برخلاف آن مدل‌ها، در این مدل‌ها مقایسات زوجی بین معیارها و گزینه‌ها انجام نمی‌شود و هر گزینه به طور مستقل با یک معیار سنجیده و ارزیابی می‌شود (حبیبی، ایزدیار و سرافرازی^{۲۸}، ۱۳۹۳).

۲-۴-۲-۱ تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

در ماتریس تصمیم‌گیری، گزینه‌ها براساس معیارها، امتیازدهی می‌شود. این ماتریس، که S نام‌گذاری می‌شود، N (تعداد گزینه‌ها) سطر و M (تعداد معیارها) ستون دارد و هر درایه s_{ij} آن به معنی امتیاز کسب‌شده گزینه i ام در معیار j ام است.

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1M} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N1} & s_{N2} & \dots & s_{NM} \end{bmatrix} \quad (25)$$

۲-۴-۲-۲ نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری

با تقسیم هر درایه در ماتریس تصمیم‌گیری بر جمع ستون مربوط به آن، اعداد ماتریس تصمیم‌گیری، همگی نرمال می‌شود. بدین ترتیب، مقیاس اعداد در نتیجه تصمیم‌گیری تأثیرگذار نیست؛ به عبارت دقیق‌تر، برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطه ذیل استفاده می‌شود:

$$n_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^N s_{ij}} \quad (26)$$

۲-۴-۳- تعیین نقطه ایدئال مثبت و منفی

برای هر معیار، بهترین و بدترین امتیاز در میان تمام گزینه‌ها تعیین و به ترتیب، ایدئال مثبت n^+ و منفی n^- نامیده می‌شود. اگر معیار مثبت (هرچه بیشتر بهتر) باشد، رابطه‌های ذیل نشان‌دهنده چگونگی محاسبه نقاط ایدئال مثبت و منفی است. در غیر این صورت، از این رابطه‌ها به صورت برعکس استفاده می‌شود.

$$n_j^+ = \max_i n_{ij} \quad \forall j \quad (27)$$

$$n_j^- = \min_i n_{ij} \quad \forall j \quad (28)$$

۲-۴-۴- محاسبه مقادیر p_i و r_i

مقادیر p_i و r_i به ترتیب، نشان‌دهنده مجموع اختلاف نسبی وزن‌دار هر گزینه نسبت به گزینه ایدئال مثبت و حداکثر اختلاف نسبی وزن‌دار هر گزینه نسبت به گزینه ایدئال مثبت است. این مقادیر به کمک روابط ذیل محاسبه می‌شود:

$$p_i = \sum_{j=1}^M w_j \frac{n_j^+ - n_{ij}}{n_j^+ - n_j^-} \quad \forall i \quad (29)$$

$$r_i = \max_j \left\{ w_j \frac{n_j^+ - n_{ij}}{n_j^+ - n_j^-} \right\} \quad \forall i \quad (30)$$

که در آن، w_j نشان‌دهنده اهمیت نسبی معیارهاست که در این پژوهش با روش AHP فازی محاسبه می‌شود. البته برای معیارهای منفی (هرچه کمتر، بهتر) در روابط مذکور، بخش $\frac{n_j^+ - n_{ij}}{n_j^+ - n_j^-}$ با $\frac{n_{ij} - n_j^+}{n_j^- - n_j^+}$ جایگزین می‌شود.

۲-۴-۵- محاسبه شاخص VIKOR برای هر معیار

مقدار q_i به عنوان شاخص ویکور به صورت ذیل برای هر گزینه محاسبه می‌شود:

$$q_i = v \left(\frac{p_i - p^+}{p^- - p^+} \right) + (1 - v) \left(\frac{r_i - r^+}{r^- - r^+} \right) \quad \forall i \quad (31)$$

که در آن:

$$p^+ = \min_i p_i \quad (32)$$

$$p^- = \max_i p_i \quad (33)$$

$$r^+ = \min_i r_i \quad (34)$$

$$r^- = \max_i r_i \quad (35)$$

همچنین، v به عنوان وزن در توافق جمعی شناخته می‌شود. براساس مبانی نظری این موضوع، اغلب شاخص VIKOR با $v = 0.5$ محاسبه شده است (موسانی و جمین^{۲۹}، ۲۰۱۵). در این پژوهش نیز همین مقدار برای v در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴-۶- انتخاب گزینه بهینه

حال باید گزینه‌ها براساس مقادیر q_i ، p_i و r_i به ترتیب نزولی مرتب شود. بهترین گزینه آن است که کوچک‌ترین مقدار q_i را داشته باشد؛ به شرط آنکه دو شرط ذیل برقرار باشد:

(۱) مزیت قابل قبول: یعنی گزینه بهینه باید با گزینه بعدی خود، تفاوت زیادی داشته باشد؛ به عبارت دقیق‌تر، اگر گزینه A_1 و A_2 در میان N گزینه از لحاظ مقدار q_i رتبه اول و دوم را داشته باشد، باید رابطه ذیل برقرار باشد:

$$q_{A_2} - q_{A_1} \geq \frac{1}{N-1} \quad (36)$$

(۲) گزینه A_1 باید حداقل در یکی از دسته‌بندی‌های p_i یا r_i به عنوان رتبه برتر شناخته شود.

اگر شرط اول برقرار نشود، آنگاه آن دسته از گزینه‌هایی که رابطه شماره (۳۶) را نقض کنند، همگی به عنوان مجموعه جواب‌های بهینه انتخاب می‌شوند؛ به عبارت دقیق‌تر، گزینه A_j در مجموعه جواب‌های بهینه قرار می‌گیرد، اگر:

$$q_{A_j} - q_{A_1} < \frac{1}{N-1} \quad (37)$$

اگر شرط دوم برقرار نشود، گزینه‌های A_1 و A_2 هر دو به عنوان گزینه بهینه انتخاب می‌شوند.

۳- مطالعه کاربردی و یافته‌ها

برای نشان دادن کاربردپذیری مدل پیشنهادی، این مدل روی اطلاعات جمع‌آوری شده بر کلید دژنکتور یکی از تجهیزات یک شرکت فولادسازی با گذراندن مراحل ذیل اجرا می‌شود. داده‌های هزینه و زمان از کارافتادگی در اثر خرابی و نت پیشگیرانه در جدول ذیل ارائه شده است:

جدول ۳- داده‌های هزینه و زمان از کارافتادگی در اثر خرابی و نت پیشگیرانه

پارامتر	C_f (ریال)	C_p (ریال)	T_f (روز)	T_p (روز)
مقدار	۱,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۴,۸۰۰,۰۰۰	۱۲۰	۰/۶۶۶۷

۳-۱- تخمین پارامترهای تابع توزیع خرابی

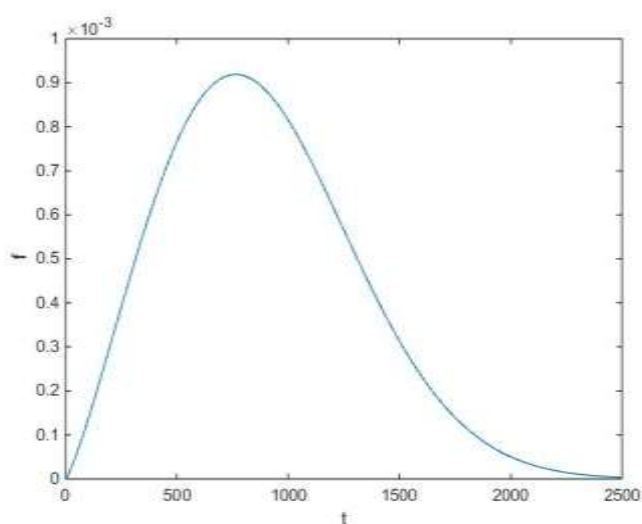
همانگونه که ذکر شد، تابع توزیع وایبول دو پارامتری به عنوان تابع توزیع خرابی قطعه مد نظر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، مطابق رابطه شماره (۱۳)، پارامتر β توزیع وایبول به کمک روش عددی نیوتن-رافسون به صورت ذیل محاسبه می‌شود. گفتنی است مقدار $\beta = 1$ به عنوان نقطه شروع الگوریتم نیوتن-رافسون در نظر گرفته شده است. همچنین، اطلاعات خرابی برحسب روز وارد شده است.

$$\beta = 2.2164 \quad (38)$$

پس از آن به کمک رابطه شماره (۱۱) مقدار α نیز به دست آمده است.

$$\alpha = 1002.2285 \quad (39)$$

بنابراین، تابع توزیع خرابی قطعه مد نظر به صورت ذیل است. با مشاهده دقیق تر این تابع، مشاهده می شود بیشترین احتمال خرابی قطعه در عمر ۷۶۵ روز است.



شکل ۳- تابع خرابی قطعه مورد مطالعه

۳-۲- تعیین گزینه های تصمیم گیری

مقادیر مجاز فاصله زمانی بین فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه این قطعه به عنوان گزینه های این تصمیم گیری تعیین می شود. پس از مشورت با خبرگان صنعت مورد مطالعه، این مقادیر - که در واقع، دامنه متغیر t_{PI} را تشکیل می دهد - برابر ۳۰ روز تا ۶۰۰ روز با گام ۵ روز تعیین شد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود نرخ خرابی قطعه در این بازه افزایشی است.

۳-۳- ویژگی های تیم خبره

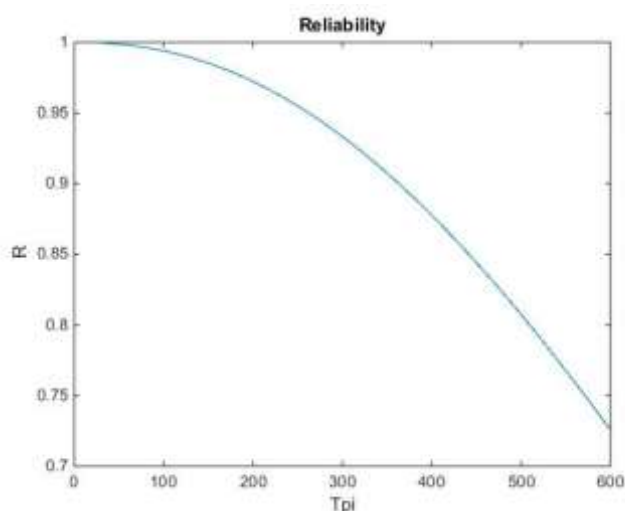
تیم خبرگان در این پژوهش متشکل از ۴ نفر با پست سازمانی مدیر تولید، سرپرست کارگاه، سرپرست نت و کارشناس برنامه ریزی تولید بوده است. سایر ویژگی های این تیم در جدول ذیل آورده شده است.

جدول ۴- ویژگی های تیم خبره

ویژگی	رده سازمانی			تحصیلات		سابقه کار		
	کارشناس	رئیس/سرپرست	مدیر	کارشناسی	کارشناسی ارشد و بالاتر	۱ تا ۱۰ سال	۱۰ تا ۲۰ سال	۲۰ تا ۳۰ سال
دسته								
تعداد	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱

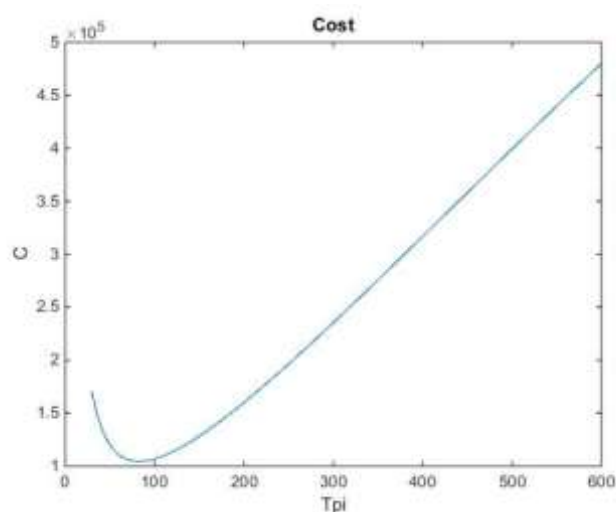
۳-۴- محاسبه معیارها

همانگونه که ذکر شد، سه معیار قابلیت اطمینان، هزینه و زمان ازکارافتادگی دستگاه به‌عنوان اهداف این تصمیم‌گیری تعیین شده است. برای محاسبه این معیارها، روابط شماره (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به کار رفته است. پس از انجام دادن محاسبات لازم به کمک نرم‌افزار MATLAB مقدار این سه معیار برای هر گزینه به دست آمده است. با رسم نمودار تغییرات معیار قابلیت اطمینان برحسب مقادیر متغیر t_{PI} نمودار ذیل حاصل می‌شود. به‌طور خاص، تا عمر ۲۵۵ روز قابلیت اطمینان قطعه مورد مطالعه، بیشتر از ۹۵ درصد خواهد بود.



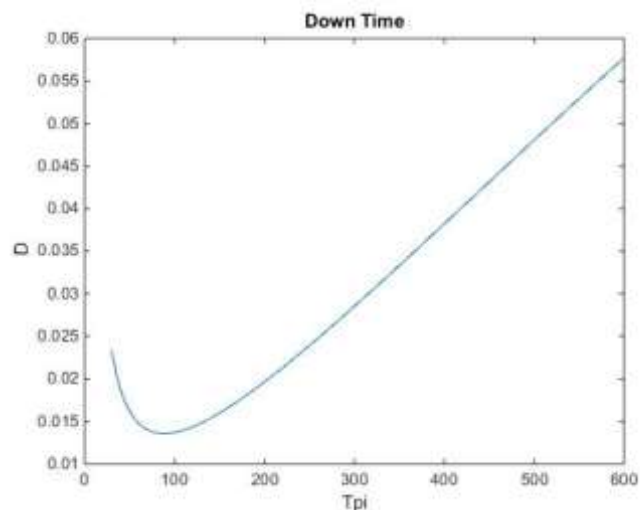
شکل ۴- تابع قابلیت اطمینان قطعه مورد مطالعه

همچنین، به‌صورت مشابه، نمودار معیار هزینه نیز برحسب مقادیر متغیر t_{PI} ترسیم شده است. در این نمودار نیز مشخص است در عمر ۸۵ روز، قطعه مد نظر، کمترین هزینه متوسط را در هر دوره تعویض خواهد داشت که برابر ۱۰۴۴۳۸ است.



شکل ۵- تابع هزینه قطعه مورد مطالعه

درنهایت، نمودار معیار زمان ازکارافتادگی دستگاه برحسب مقادیر متغیر t_{PI} نیز در شکل ذیل نشان داده شده است. با توجه به این نمودار نیز می‌توان نتیجه گرفت کمترین زمان لازم برای تعمیر دستگاه به‌علت خرابی قطعه مربوط در سرفاصله‌های زمانی تعویض ۸۰ تا ۹۵ روز اتفاق می‌افتد.



شکل ۶- تابع مدت زمان ازکارافتادگی دستگاه در اثر خرابی قطعه مورد مطالعه

۳-۵- اجرای AHP فازی

پس از مقایسات زوجی معیارها با یکدیگر با محاسبه میانگین هندسی نظرات خبرگان، ماتریس $\tilde{B}$ به شکل ذیل حاصل می شود:

جدول ۵- ماتریس حاصل از مقایسات زوجی معیارها توسط خبرگان شرکت مورد مطالعه

$\tilde{B}$	زمان ازکارافتادگی	هزینه	قابلیت اطمینان
قابلیت اطمینان	(۸/۴۸۵ ۷/۹۳۷ ۷/۳۴۸)	(۷/۹۶۹ ۷/۱۷۲ ۶/۳۴۴)	(۱ ۱ ۱)
هزینه	(۰/۶۳۹ ۰/۵۷۷ ۰/۵۲۲)	(۱ ۱ ۱)	(۰/۱۲۵ ۰/۱۳۹ ۰/۱۵۸)
زمان ازکارافتادگی	(۱ ۱ ۱)	(۱/۹۱۷ ۱/۷۳۲ ۱/۵۶۵)	(۰/۱۳۶ ۰/۱۲۶ ۰/۱۱۸)

در نتیجه، براساس روابط شماره (۲۰) و (۲۱)، میزان وزن نسبی معیارها نسبت به یکدیگر به صورت ذیل به دست می آید:

جدول ۶- میزان اهمیت نسبی معیارها در حالت فازی

معیار	میزان اهمیت نسبی
قابلیت اطمینان	(۰/۷۶ ۰/۶۹۳ ۰/۶۳)
هزینه	(۰/۱۴۹ ۰/۱۳۴ ۰/۱۲۲)
زمان ازکارافتادگی	(۰/۱۸۹ ۰/۱۷۲ ۰/۱۵۸)

با توجه به رابطه شماره (۲۲)، وزن نسبی غیرفازی معیارها به دست می آید.

جدول ۷- میزان اهمیت نسبی معیارها در حالت غیرفازی

معیار	میزان اهمیت نسبی
قابلیت اطمینان	۰/۶۹۴
هزینه	۰/۱۳۵
زمان ازکارافتادگی	۰/۱۷۳

حال باید کیفیت این محاسبات آزموده شود. به کمک رابطه شماره (۲۴)، شاخص نرخ ثبات (CR) برابر ۰/۴۱۸۴ محاسبه می‌شود. گفتنی است با توجه به تعداد معیارهای تصمیم‌گیری، مقدار پارامتر RCI برابر ۰/۵۲ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، با توجه به اینکه شاخص $CR < ۰/۱$ است، این نتیجه به دست می‌آید که مقایسات زوجی انجام‌شده، ثبات کافی دارد.

۳-۶- اجرای VIKOR

در اینجا ماتریس تصمیم‌گیری شامل مقادیر محاسبه‌شده برای معیارهای تصمیم‌گیری به‌ازای مقادیر متفاوت T_{PI} است.

جدول ۸- ماتریس تصمیم‌گیری

T_{PI}	R	C	D	T_{PI}	R	C	D	T_{PI}	R	C	D	T_{PI}	R	C	D	T_{PI}	R	C	D
۳۰	۱/۰۰۰	۱۶۹۸۷۰	۰/۰۲۳۳	۱۴۵	۰/۹۸۶	۱۲۵۵۴۲	۰/۰۱۵۷	۲۶۰	۰/۹۵۱	۲۰۴۰۹۷	۰/۰۲۴۸	۳۷۵	۰/۸۹۳	۲۹۶۲۳۲	۰/۰۳۵۸	۴۹۰	۰/۸۱۵	۳۹۱۱۰۶	۰/۰۴۷۱
۳۵	۰/۹۹۹	۱۵۰۷۶۸	۰/۰۲۰۶	۱۵۰	۰/۹۸۵	۱۲۸۳۰۹	۰/۰۱۶۰	۲۶۵	۰/۹۴۹	۲۰۷۹۴۵	۰/۰۲۵۳	۳۸۰	۰/۸۹۰	۳۰۰۳۴۴	۰/۰۳۶۳	۴۹۵	۰/۸۱۱	۳۹۵۲۱۲	۰/۰۴۷۶
۴۰	۰/۹۹۹	۱۳۷۱۵۲	۰/۰۱۸۷	۱۵۵	۰/۹۸۴	۱۳۱۱۶۹	۰/۰۱۶۳	۲۷۰	۰/۹۴۷	۲۱۱۸۱۳	۰/۰۲۵۷	۳۸۵	۰/۸۸۷	۳۰۴۴۶۰	۰/۰۳۶۷	۵۰۰	۰/۸۰۷	۳۹۹۳۱۳	۰/۰۴۸۱
۴۵	۰/۹۹۹	۱۲۷۲۴۰	۰/۰۱۷۲	۱۶۰	۰/۹۸۳	۱۳۴۱۱۴	۰/۰۱۶۶	۲۷۵	۰/۹۴۵	۲۱۵۷۰۱	۰/۰۲۶۲	۳۹۰	۰/۸۸۴	۳۰۸۵۸۰	۰/۰۳۷۲	۵۰۵	۰/۸۰۳	۴۰۳۴۱۰	۰/۰۴۸۶
۵۰	۰/۹۹۹	۱۱۹۹۵۱	۰/۰۱۶۲	۱۶۵	۰/۹۸۲	۱۳۷۱۳۷	۰/۰۱۷۰	۲۸۰	۰/۹۴۲	۲۱۹۶۰۸	۰/۰۲۶۷	۳۹۵	۰/۸۸۱	۳۱۲۷۰۳	۰/۰۳۷۷	۵۱۰	۰/۸۰۰	۴۰۷۵۰۲	۰/۰۴۹۰
۵۵	۰/۹۹۸	۱۱۴۵۹۲	۰/۰۱۵۴	۱۷۰	۰/۹۸۱	۱۴۰۲۳۳	۰/۰۱۷۳	۲۸۵	۰/۹۴۰	۲۲۳۵۳۲	۰/۰۲۷۱	۴۰۰	۰/۸۷۸	۳۱۶۸۲۸	۰/۰۳۸۲	۵۱۵	۰/۷۹۶	۴۱۱۵۸۸	۰/۰۴۹۵
۶۰	۰/۹۹۸	۱۱۰۶۹۷	۰/۰۱۴۸	۱۷۵	۰/۹۷۹	۱۴۳۳۹۵	۰/۰۱۷۷	۲۹۰	۰/۹۳۸	۲۲۷۴۷۲	۰/۰۲۷۶	۴۰۵	۰/۸۷۴	۳۲۰۹۵۶	۰/۰۳۸۷	۵۲۰	۰/۷۹۲	۴۱۵۶۶۹	۰/۰۵۰۰
۶۵	۰/۹۹۸	۱۰۷۹۴۰	۰/۰۱۴۳	۱۸۰	۰/۹۷۸	۱۴۶۶۲۰	۰/۰۱۸۱	۲۹۵	۰/۹۳۶	۲۳۱۴۲۸	۰/۰۲۸۱	۴۱۰	۰/۸۷۱	۳۲۵۰۸۶	۰/۰۳۹۲	۵۲۵	۰/۷۸۸	۴۱۹۷۴۵	۰/۰۵۰۵
۷۰	۰/۹۹۷	۱۰۶۰۸۸	۰/۰۱۴۰	۱۸۵	۰/۹۷۷	۱۴۹۹۰۴	۰/۰۱۸۵	۳۰۰	۰/۹۳۳	۲۳۵۳۹۹	۰/۰۲۸۵	۴۱۵	۰/۸۶۸	۳۲۹۲۱۷	۰/۰۳۹۷	۵۳۰	۰/۷۸۴	۴۲۳۸۱۵	۰/۰۵۱۰
۷۵	۰/۹۹۷	۱۰۴۹۶۹	۰/۰۱۳۸	۱۹۰	۰/۹۷۵	۱۵۳۲۴۱	۰/۰۱۸۸	۳۰۵	۰/۹۳۱	۲۳۹۳۸۴	۰/۰۲۹۰	۴۲۰	۰/۸۶۵	۳۳۳۳۴۹	۰/۰۴۰۲	۵۳۵	۰/۷۸۰	۴۲۷۸۷۸	۰/۰۵۱۵
۸۰	۰/۹۹۶	۱۰۴۴۵۳	۰/۰۱۳۶	۱۹۵	۰/۹۷۴	۱۵۶۶۲۹	۰/۰۱۹۲	۳۱۰	۰/۹۲۸	۲۴۳۳۸۲	۰/۰۲۹۵	۴۲۵	۰/۸۶۱	۳۳۷۴۸۲	۰/۰۴۰۷	۵۴۰	۰/۷۷۶	۴۳۱۹۳۵	۰/۰۵۲۰
۸۵	۰/۹۹۶	۱۰۴۴۳۸	۰/۰۱۳۶	۲۰۰	۰/۹۷۲	۱۶۰۰۶۴	۰/۰۱۹۶	۳۱۵	۰/۹۲۶	۲۴۷۳۹۲	۰/۰۳۰۰	۴۳۰	۰/۸۵۸	۳۴۱۶۱۵	۰/۰۴۱۲	۵۴۵	۰/۷۷۲	۴۳۵۹۸۵	۰/۰۵۲۴
۹۰	۰/۹۹۵	۱۰۴۸۴۸	۰/۰۱۳۶	۲۰۵	۰/۹۷۱	۱۶۳۵۴۴	۰/۰۲۰۰	۳۲۰	۰/۹۲۳	۲۵۱۴۱۴	۰/۰۳۰۴	۴۳۵	۰/۸۵۴	۳۴۵۷۴۸	۰/۰۴۱۷	۵۵۰	۰/۷۶۸	۴۴۰۰۲۹	۰/۰۵۲۹
۹۵	۰/۹۹۵	۱۰۵۶۲۰	۰/۰۱۳۶	۲۱۰	۰/۹۶۹	۱۶۷۰۶۵	۰/۰۲۰۵	۳۲۵	۰/۹۲۱	۲۵۵۴۴۶	۰/۰۳۰۹	۴۴۰	۰/۸۵۱	۳۴۹۸۸۱	۰/۰۴۲۲	۵۵۵	۰/۷۶۴	۴۴۴۰۶۵	۰/۰۵۳۴
۱۰۰	۰/۹۹۴	۱۰۶۷۰۳	۰/۰۱۳۷	۲۱۵	۰/۹۶۸	۱۷۰۶۲۵	۰/۰۲۰۹	۳۳۰	۰/۹۱۸	۲۵۹۴۸۹	۰/۰۳۱۴	۴۴۵	۰/۸۴۸	۳۵۴۰۱۲	۰/۰۴۲۷	۵۶۰	۰/۷۵۹	۴۴۸۰۹۳	۰/۰۵۳۹
۱۰۵	۰/۹۹۳	۱۰۸۰۵۷	۰/۰۱۳۸	۲۲۰	۰/۹۶۶	۱۷۴۲۲۳	۰/۰۲۱۳	۳۳۵	۰/۹۱۶	۲۶۳۵۴۲	۰/۰۳۱۹	۴۵۰	۰/۸۴۴	۳۵۸۱۴۳	۰/۰۴۳۱	۵۶۵	۰/۷۵۵	۴۵۲۱۱۴	۰/۰۵۴۴
۱۱۰	۰/۹۹۳	۱۰۹۶۴۸	۰/۰۱۴۰	۲۲۵	۰/۹۶۴	۱۷۷۸۵۵	۰/۰۲۱۷	۳۴۰	۰/۹۱۳	۲۶۷۶۰۳	۰/۰۳۲۴	۴۵۵	۰/۸۴۱	۳۶۲۲۷۲	۰/۰۴۳۶	۵۷۰	۰/۷۵۱	۴۵۶۱۲۷	۰/۰۵۴۹
۱۱۵	۰/۹۹۲	۱۱۱۴۴۸	۰/۰۱۴۱	۲۳۰	۰/۹۶۲	۱۸۱۵۱۹	۰/۰۲۲۲	۳۴۵	۰/۹۱۰	۲۷۱۶۷۲	۰/۰۳۲۸	۴۶۰	۰/۸۳۷	۳۶۶۳۹۹	۰/۰۴۴۱	۵۷۵	۰/۷۴۷	۴۶۰۱۳۲	۰/۰۵۵۳
۱۲۰	۰/۹۹۱	۱۱۳۴۳۴	۰/۰۱۴۴	۲۳۵	۰/۹۶۱	۱۸۵۲۱۵	۰/۰۲۲۶	۳۵۰	۰/۹۰۷	۲۷۵۷۵۰	۰/۰۳۳۳	۴۶۵	۰/۸۳۳	۳۷۰۵۲۴	۰/۰۴۴۶	۵۸۰	۰/۷۴۳	۴۶۴۱۲۹	۰/۰۵۵۸
۱۲۵	۰/۹۹۰	۱۱۵۵۸۶	۰/۰۱۴۶	۲۴۰	۰/۹۵۹	۱۸۸۹۳۹	۰/۰۲۳۰	۳۵۵	۰/۹۰۵	۲۷۹۸۳۴	۰/۰۳۳۸	۴۷۰	۰/۸۳۰	۳۷۴۶۶۷	۰/۰۴۵۱	۵۸۵	۰/۷۳۸	۴۶۸۱۱۷	۰/۰۵۶۳
۱۳۰	۰/۹۸۹	۱۱۷۸۸۶	۰/۰۱۴۸	۲۴۵	۰/۹۵۷	۱۹۲۶۹۱	۰/۰۲۳۵	۳۶۰	۰/۹۰۲	۲۸۳۹۲۵	۰/۰۳۴۳	۴۷۵	۰/۸۲۶	۳۷۸۷۶۷	۰/۰۴۵۶	۵۹۰	۰/۷۳۴	۴۷۲۰۹۶	۰/۰۵۶۸
۱۳۵	۰/۹۸۸	۱۲۰۳۲۰	۰/۰۱۵۱	۲۵۰	۰/۹۵۵	۱۹۶۴۶۹	۰/۰۲۳۹	۳۶۵	۰/۸۹۹	۲۸۸۰۲۲	۰/۰۳۴۸	۴۸۰	۰/۸۲۲	۳۸۲۸۸۴	۰/۰۴۶۱	۵۹۵	۰/۷۳۰	۴۷۶۰۶۷	۰/۰۵۷۲
۱۴۰	۰/۹۸۷	۱۲۲۸۷۶	۰/۰۱۵۴	۲۵۵	۰/۹۵۳	۲۰۰۲۷۲	۰/۰۲۴۴	۳۷۰	۰/۸۹۶	۲۹۲۱۲۵	۰/۰۳۵۳	۴۸۵	۰/۸۱۹	۳۸۶۹۹۷	۰/۰۴۶۶	۶۰۰	۰/۷۲۶	۴۸۰۰۲۸	۰/۰۵۷۷

در نتیجه، نقطه ایدئال مثبت و منفی برای هر معیار مطابق روابط شماره (۲۷) و (۲۸) را به‌صورت ذیل می‌توان محاسبه کرد:

جدول ۹- نقطه ایدئال مثبت و منفی برای هر معیار

معیار	ایدئال مثبت	ایدئال منفی
قابلیت اطمینان	۰/۰۰۶۹۸	۰/۰۰۹۶۲
هزینه	۰/۰۱۶۰۱	۰/۰۰۳۴۸
زمان ازکارافتادگی	۰/۰۱۵۸۱	۰/۰۰۳۷۲

پس از آن، مقادیر p_i و r_i به کمک روابط شماره (۲۹) و (۳۰) محاسبه می‌شود و مقادیر p^+, p^-, r^+, r^- به صورت ذیل به دست می‌آید:

جدول ۱۰- مقادیر p^+, p^-, r^+, r^-

p^+	p^-	r^+	r^-
۰/۰۰۸۰۵	۱/۰۰۲۲	۰/۰۰۴۷	۰/۶۹۴۰۹

در نهایت، شاخص VIKOR براساس رابطه شماره (۳۱) برای هر گزینه محاسبه می‌شود.

جدول ۱۱- مقادیر q_i

T_{PI}	q_i	T_{PI}	q_i	T_{PI}	q_i	T_{PI}	q_i	T_{PI}	q_i
۳۰	۰/۰۵۱۳۹	۱۴۵	۰/۰۴۱۷۷	۲۶۰	۰/۱۸۳۹۶	۳۷۵	۰/۴۰۲۶۳	۴۹۰	۰/۶۸۵۲۶
۳۵	۰/۰۳۵۱۲	۱۵۰	۰/۰۴۶۱۸	۲۶۵	۰/۱۹۱۹۵	۳۸۰	۰/۴۱۳۶۹	۴۹۵	۰/۶۹۸۷۵
۴۰	۰/۰۲۳۵۴	۱۵۵	۰/۰۵۰۷۷	۲۷۰	۰/۲۰۰۰۱	۳۸۵	۰/۴۲۴۸۸	۵۰۰	۰/۷۱۲۳۴
۴۵	۰/۰۱۵۱۴	۱۶۰	۰/۰۵۵۵۲	۲۷۵	۰/۲۰۸۳۸	۳۹۰	۰/۴۳۶۱۸	۵۰۵	۰/۷۲۶۰۱
۵۰	۰/۰۰۹۰۱	۱۶۵	۰/۰۶۰۴۵	۲۸۰	۰/۲۱۶۸۱	۳۹۵	۰/۴۴۷۶۶	۵۱۰	۰/۷۳۹۷۶
۵۵	۰/۰۰۴۵۶	۱۷۰	۰/۰۶۵۵۴	۲۸۵	۰/۲۲۵۳۸	۴۰۰	۰/۴۵۹۱۴	۵۱۵	۰/۷۵۳۶۶
۶۰	۰/۰۰۱۳۹	۱۷۵	۰/۰۷۰۷۹	۲۹۰	۰/۲۳۴۰۸	۴۰۵	۰/۴۷۰۷۹	۵۲۰	۰/۷۶۷۵۲
۶۵	۰/۰۰۰۵۹	۱۸۰	۰/۰۷۶۲۱	۲۹۵	۰/۲۴۲۹۳	۴۱۰	۰/۴۸۲۵۶	۵۲۵	۰/۷۸۱۵۲
۷۰	۰/۰۰۰۹۱	۱۸۵	۰/۰۸۱۷۹	۳۰۰	۰/۲۵۱۹۲	۴۱۵	۰/۴۹۴۴۴	۵۳۰	۰/۷۹۵۰۶
۷۵	۰/۰۰۱۶۸	۱۹۰	۰/۰۸۷۵۳	۳۰۵	۰/۲۶۱۰۴	۴۲۰	۰/۵۰۶۴۳	۵۳۵	۰/۸۰۹۷۶
۸۰	۰/۰۰۲۸۵	۱۹۵	۰/۰۹۳۴۳	۳۱۰	۰/۲۷۰۰۳	۴۲۵	۰/۵۱۸۵۳	۵۴۰	۰/۸۲۳۹۹
۸۵	۰/۰۰۴۳۵	۲۰۰	۰/۰۹۹۴۸	۳۱۵	۰/۲۷۹۶۹	۴۳۰	۰/۵۳۰۷۴	۵۴۵	۰/۸۳۸۳۳
۹۰	۰/۰۰۶۱۷	۲۰۵	۰/۱۰۵۶۹	۳۲۰	۰/۲۸۹۲۲	۴۳۵	۰/۵۴۳۰۶	۵۵۰	۰/۸۵۲۶۷
۹۵	۰/۰۰۸۲۸	۲۱۰	۰/۱۱۲۰۵	۳۲۵	۰/۲۹۸۸۸	۴۴۰	۰/۵۵۵۴۹	۵۵۵	۰/۸۶۷۱۲
۱۰۰	۰/۰۱۰۶۵	۲۱۵	۰/۱۱۸۵۷	۳۳۰	۰/۳۰۸۶۸	۴۴۵	۰/۵۶۸۰۱	۵۶۰	۰/۸۸۱۶۳
۱۰۵	۰/۰۱۳۲۶	۲۲۰	۰/۱۲۵۲۳	۳۳۵	۰/۳۱۸۶۱	۴۵۰	۰/۵۸۰۶۵	۵۶۵	۰/۸۹۶۲۲
۱۱۰	۰/۰۱۶۱۱	۲۲۵	۰/۱۳۲۰۵	۳۴۰	۰/۳۲۸۶۶	۴۵۵	۰/۵۹۳۳۸	۵۷۰	۰/۹۱۰۸۶
۱۱۵	۰/۰۱۹۱۸	۲۳۰	۰/۱۳۹۰۲	۳۴۵	۰/۳۳۸۸۵	۴۶۰	۰/۶۰۶۲۲	۵۷۵	۰/۹۲۵۵۷
۱۲۰	۰/۰۲۲۴۶	۲۳۵	۰/۱۴۶۱۴	۳۵۰	۰/۳۴۹۱۶	۴۶۵	۰/۶۱۹۱۵	۵۸۰	۰/۹۴۰۳۴
۱۲۵	۰/۰۲۵۹۴	۲۴۰	۰/۱۵۳۴۱	۳۵۵	۰/۳۵۹۶۱	۴۷۰	۰/۶۳۲۱۸	۵۸۵	۰/۹۵۵۱۷
۱۳۰	۰/۰۲۹۶۲	۲۴۵	۰/۱۶۰۸۳	۳۶۰	۰/۳۷۰۱۸	۴۷۵	۰/۶۴۵۳۱	۵۹۰	۰/۹۷۰۰۶
۱۳۵	۰/۰۳۳۴۸	۲۵۰	۰/۱۶۸۳۹	۳۶۵	۰/۳۸۰۸۷	۴۸۰	۰/۶۵۸۵۳	۵۹۵	۰/۹۸۵
۱۴۰	۰/۰۳۷۵۴	۲۵۵	۰/۱۷۶۱	۳۷۰	۰/۳۹۱۶۹	۴۸۵	۰/۶۷۱۸۵	۶۰۰	۱

با توجه به قواعد تصمیم‌گیری در روش VIKOR، گزینه $T_{PI} = 65$ کوچک‌ترین مقدار q_i را دارد؛ ولی اختلاف مقدار q_i آن با بهترین گزینه بعدی ($T_{PI} = 70$)، بیشتر از $0/00877 \left(\frac{1}{115-1} \right)$ است؛ بنابراین، این نتیجه به دست می‌آید که مجموعه گزینه‌هایی که اختلاف آنها با گزینه $T_{PI} = 65$ کمتر از مقدار مذکور است، همگی به‌عنوان مجموعه بهینه انتخاب می‌شود. بدین ترتیب، گزینه‌های $T_{PI} = 50$ الی $T_{PI} = 90$ مجموعه گزینه‌های بهینه را تشکیل

می‌دهد. با مقایسه مجموعه گزینه‌های بهینه با شرایط فعلی شرکت مورد مطالعه، این نتیجه به دست می‌آید که با توجه به اهمیت معیار قابلیت اطمینان، زمان تعویض قطعه مد نظر (به‌صورت میانگین) باید حداقل به نصف کاهش یابد.

۴- بحث

با مقایسه دقیق تر خروجی مدل پیشنهادی و وضعیت موجود می‌توان درباره کیفیت مدل پیشنهادی بحث کرد. در شرایط واقعی، برنامه تعویض پیشگیرانه قطعه مربوط، ۱۸۰ روزه است و جدول ذیل، داده‌های فاصله زمانی تعویض این قطعه را توصیف می‌کند:

جدول ۱۲- توصیف داده‌های جمع‌آوری شده

شاخص	تعداد	میانگین (روز)	مینیمم (روز)	ماکزیمم (روز)	میان	چارک اول	چارک سوم	انحراف معیار (روز)
مقدار	۲۹	۲۰۱	۶۵	۳۸۴	۱۸۹	۱۵۱	۲۱۹	۸۱

همانگونه که مشاهده می‌شود، داده‌ها پراکندگی زیادی دارد و قطعه مربوط معمولاً کمی دیرتر از برنامه تعویض می‌شده که این امر به علت شرایط و محدودیت‌های تولید و نت بوده است.

همچنین، بازه زمانی بهینه‌ای که با مدل محاسبه شد، از ۵۰ تا ۹۰ روز است. در جدول ذیل، میانگین فاصله زمانی تعویض قطعه در شرایط واقعی و میانگین بهینه پیشنهادی با توجه به اطلاعات جدول ۸ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۱۳- مقایسه شرایط موجود و بهینه

معیار	قابلیت اطمینان	هزینه (ریال)	زمان ازکارافتادگی (روز)
شرایط واقعی (۲۰۰ روز)	۰/۹۷۲	۱۶۰۰۶۴	۰۰/۱۹۶
مدل پیشنهادی (۷۰ روز)	۰/۹۹۷	۱۰۶۰۸۸	۰۰/۱۴۰
درصد بهبود	۲/۶	۳۳/۷	۲۸/۶

همانگونه که مشاهده می‌شود، با به‌کارگیری مدل پیشنهادی انتظار می‌رود پراهمیت‌ترین معیار، یعنی قابلیت اطمینان، ۲/۶ درصد بهبود داشته باشد و درباره معیارهای هزینه و زمان ازکارافتادگی نیز بهبود زیادی (۳۳/۷ و ۲۸/۶ درصد) حاصل شود.

۵- نتیجه‌گیری

مسئله‌ای که در این پژوهش مد نظر قرار گرفت، تعیین سرفاصله زمانی فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است. فرضیات این مسئله به این شرح است که دستگاهی وجود دارد که قطعه‌ای از آن در حال حاضر در فواصل زمانی غیرثابت با قطعه کاملاً مشابهی تعویض می‌شود و تابع خرابی قطعه از توزیع وایبول تبعیت می‌کند. هدف از مطرح کردن این مسئله، تعیین یک فاصله زمانی بهینه برای تعویض قطعه مد نظر است؛ به‌گونه‌ای که درباره معیارهای قابلیت اطمینان، هزینه و زمان ازکارافتادگی توافق شود. معیارهای هزینه و زمان ازکارافتادگی، درواقع، هزینه و زمان ازکارافتادگی حاصل از خرابی و تعویض قطعه به‌صورت پیشگیرانه در هر دوره تعویض را نشان

می‌دهد. مدل پیشنهادی با ترکیب روش‌های AHP فازی و VIKOR تشکیل شد؛ بدین‌صورت که ابتدا به کمک روش AHP فازی، اهمیت معیارها به‌صورت فازی بررسی و تحلیل می‌شود. پس از تعیین اهمیت نهایی هر معیار، گزینه‌های مختلف، که دامنه تغییرات سرفاصله زمانی تعویض قطعه است، با به‌کارگیری روش VIKOR رتبه‌بندی می‌شود. در این پژوهش، برای نشان‌دادن قابلیت کاربرد مدل پیشنهادی، مسئله‌ای واقعی از یک شرکت فولادسازی بررسی و تحلیل شد. در مثال مورد مطالعه، فاصله زمانی بهینه برای کلید دژنکتور یکی از کمپرسورهای کارگاه اکسیژن شرکت مربوط تعیین شد.

برای توسعه این پژوهش و پژوهش‌های آتی در این زمینه، پیشنهاد می‌شود روش FAHP با مدل دیگری جایگزین شود که بدون نیاز به قضاوت‌های انسانی، اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری را برای تمامی قطعات محاسبه کند (به عنوان مثال با استفاده از هوش مصنوعی). همچنین، بررسی توابع توزیع احتمال دیگری، مانند گاما، لاگ‌نرمال و ... نیز می‌تواند در بهبود نتایج این مطالعه اثربخش باشد.

References

- Akram, S., and ul Ann, Q. (2015). "Newton Raphson Method". *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(7): 1748-1752.
- Azadeh, A., Sheikhalishahi, M., Firoozi, M., and Khalili, S. (2013). "An integrated multi-criteria Taguchi computer simulation-DEA approach for optimum maintenance policy and planning by incorporating learning effects". *International Journal of Production Research*, 51(18): 5374-5385.
- Bahrami, K., Price, J., and Mathew, J. (2000). "The constant-interval replacement model for preventive maintenance: a new perspective". *International Journal of Quality and Reliability Management*, 17(8): 822-838 .
- Cavalcante, C., and De Almeida, A. (2007). "A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(4): 385-397 .
- Cavalcante, C.A.V., Ferreira, R.J.P., and de Almeida, A.T. (2010). "A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach". *IMA Journal of Management Mathematics*, 21(4): 333-348 .
- Chareonsuk, C., Nagarur, N., and Tabucanon, M.T. (1997). "A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals". *International Journal of Production Economics*, 49(1): 55-64.
- Durán, O. (2011). "Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach". *Advances in Engineering Software*, 42(10): 821-829.
- Ebrahimipour, V., Najjarbashi, A., and Sheikhalishahi, M. (2015). "Multi-objective modeling for preventive maintenance scheduling in a multiple production line". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(1): 111-122.
- Emovon, I., Norman, R.A., and Murphy, A.J. (2016a). "The development of a model for determining scheduled replacement intervals for marine machinery systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", Part M: *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(3): 723-739.
- Emovon, I., Norman, R.A., and Murphy, A.J. (2016b). "An integration of multi-criteria decision making techniques with a delay time model for determination of inspection intervals for marine machinery systems". *Applied Ocean Research*, 59: 65-82.
- Esmacilian, M., Jafarnejad, A., and Jebeli, S. (2013). "Introducing new heuristic methods to schedule preventive maintenance". *Production and Operations Management*, 4(1): 1-20.

- Faghihinia, E., and Mollaverdi, N. (2012). "Building a maintenance policy through a multi-criterion decision-making model". *Journal of Industrial Engineering International*, 8(1): 14.
- Ferreira, R.J., de Almeida, A.T., and Cavalcante, C.A. (2009). "A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis". *Reliability Engineering and System Safety*, 94(5): 905-912
 - Habibi, A., Izadyar, S., and Sarafrazi, A. (2014). *Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making*. Rasht: Katibeh Gil .
 - Huang, J., Miller, C., and Okogbaa, O. (1995). "Optimal preventive-replacement intervals for the Weibull life distribution: solutions and applications". Paper presented at the Reliability and Maintainability Symposium, 1995. Proceedings., Annual.
 - Jardine, A.K., and Tsang, A.H. (2013). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. Boca Raton: CRC press.
 - Karbasian, M., Ghandehari, M., and Abedi, S. (2010). "Optimizing Reliability Centered Preventive Maintenance Based on Costs and Location-Dependent Reliability of System Components". *Production and Operations Management*, 1(1): 19-30.
- Kirubakaran, B., and Ilangkumaran, M. (2016). "Selection of optimum maintenance strategy based on FAHP integrated with GRA-TOPSIS". *Annals of Operations Research*, 245(1-2): 285-313.
- Musani, S., and Jemain, A.A. (2015). "Ranking schools' academic performance using a fuzzy VIKOR". Paper presented in *Journal of Physics: Conference Series*. 622(1), 012036. IOP Publishing.
 - Takata, S., Kirnura, F., Van Houten, F., Westkamper, E., Shpitalni, M., Ceglarek, D., and Lee, J. (2004). "Maintenance: changing role in life cycle management". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53(2): 643-655.

-
- ¹. Breakdown Maintenance (BM)
 - ². Run-To-Failure (RTF)
 - ³. Corrective Maintenance (CM)
 - ⁴. Takata
 - ⁵. Emovon, Norman and Murphy
 - ⁶. Age-Replacement (AR)
 - ⁷. Block-Replacement (BR)
 - ⁸. Huang, Miller and Okogbaa
 - ⁹. Bahrami, Price and Mathew
 - ¹⁰. Chareonsuk, Nagarur and Tabucanon
 - ¹¹. Cavalcante and De Almeida
 - ¹². Ferreira, De Almeida and Cavalcante
 - ¹³. Cavalcante, Ferreira and De Almeida
 - ¹⁴. Faghihinia and Mollaverdi
 - ¹⁵. Geometrical Analysis for Interactive Aid (GAIA)
 - ¹⁶. Azadeh, Sheikhalishahi, Firoozi
 - ¹⁷. Data Envelopment Analysis (DEA)
 - ¹⁸. ELimination Et Choice in Translating to REality (ELECTRE)
 - ¹⁹. Karbasian, Ghandehari and Abedi
 - ²⁰. Esmailian, Jafarnejad and Jebeli
 - ²¹. Maximum Likelihood Estimation (MLE)
 - ²². Akram and ul Ann
 - ²³. Jardine and Tsang
 - ²⁴. Kirubakaran and Ilangkumaran
 - ²⁵. Durán
 - ²⁶. Consistency Ratio (CI)
 - ²⁷. Random Consistency Index (RCI)
 - ²⁸. Habibi, Izadyar and Sarafrazi
 - ²⁹. Musani and Jemain