



Selecting the optimal maintenance policy using fuzzy EDAS multi-criteria decision making

Nosratollah Esmaili¹ | Mahmoud Shahrakhi^{2*}

1. Master of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: nos_esm@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.Shahrokhi@uok.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	This paper provides a practical method to collect the opinion and experience of experts and use them to make decisions in the field of choosing the best options for maintenance and repairs. In the proposed method, first, the opinions of experts are collected and aggregated, and using the basics of failure modes and effects analysis (FMEA), this information is summarized and expressed in the form of decision-making criteria. In the following, the maintenance and repair approaches for each of the failure modes are ranked according to the required resources and the expected results from their implementation, using the fuzzy EDAS method. The proposed approach has been used for the set of compressors of Ilam Petrochemical Utility Unit. In this regard, firstly, the failure modes, which cause disruptions in the performance and, as a result, the compressors being taken out of service, have been examined, and among them, the consequences of five critical failure modes have been selected to being examined, based on the OREDA standard and the opinion of experts. The consequences of these failure modes on the compressor performance and finally their effects on the production process have been analyzed. Solutions have been proposed to deal with each of these failures and these solutions have been ranked.
Article history:	
Received: 27/06/2024	
Received in revised form: 06/11/2024	
Accepted: 10/12/2024	
Keywords: Maintenance and repair policy, Multi-criteria decision making, FMEA, Compressor, Fuzzy EDAS method.	

Cite this article: Esmaili, N., Shahrakhi, M. (2025). Selecting the optimal maintenance policy using fuzzy EDAS multi-criteria decision making. *Research of Management and productivity studies*, 1 (1), 1-21.



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmps.2024.141669.1006>

Publisher: University of Kurdistan

گزینش سیاست بهینه نگهداشت با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره EDAS فازی

نصرت‌اله اسماعیلی^۱ | محمود شهرخی^{۲*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: nos_esm@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: m.Shahrokhi@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	امروزه مدیریت صحیح دارایی‌های فیزیکی یکی از مهمترین روش‌های رقابت و حفظ جایگاه سازمان‌های تجهیز-محور در عرصه رقابت جهانی است. به کارگیری این رویکرد، به ویژه برای تجهیزات زیربنایی، در صنایع فرآیندی، با تولید پیوسته، بسیار مهم است، زیرا سلامت این تجهیزات در سودآوری تولید نقش مستقیم دارد. هدف این مقاله، ارائه یک روش کاربردی برای جمع‌آوری دیدگاه و تجربه نخبگان و به کارگیری آن‌ها برای تصمیم‌گیری در زمینه انتخاب برترین گزینه‌های نگهداری و تعمیرات است. در روش پیشنهادی، نخست نظرات خبرگان گردآوری و تجمیع شده و با استفاده از مبانی روش تحلیل خرابی‌ها و پیامدهای آن‌ها (FMEA) این اطلاعات جمع‌بندی و در قالب معیارهای تصمیم‌گیری بیان می‌شوند. در ادامه رویکردهای نگهداری و تعمیرات برای هر یک از حالات خرابی، با توجه به منابع مورد نیاز و نتایج مورد انتظار از اعمال آن‌ها، به روش EDAS فازی رتبه‌بندی می‌شوند. رویکرد پیشنهادی برای مجموعه کمپرسورهای واحد یوتیلیتی پتروشیمی ایلام استفاده شده است. در این راستا، نخست حالات خرابی؛ که باعث ایجاد اختلال در عملکرد و به تبع آن، از سرویس خارج شدن کمپرسورها می‌شود، بررسی شده و از میان آن‌ها پیامدهای پنج حالت خرابی بحرانی، براساس استاندارد OREDA و نظر کارشناسان بررسی شده است. پیامدهای این حالات خرابی بر عملکرد کمپرسور و نهایتاً اثرات آن‌ها بر روند تولید تحلیل شده است. برای مواجهه با هر یک از این خرابی‌ها راهکارهایی پیشنهاد شده و این راهکارها رتبه‌بندی شده‌اند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰	
واژه‌های کلیدی: سیاست نگهداری و تعمیرات، تصمیم‌گیری چندمعیاره، FMEA، کمپرسور، روش EDAS فازی.	

استناد: اسماعیلی، نصرت‌اله؛ شهرخی، محمود (۱۴۰۴). گزینش سیاست بهینه نگهداشت با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره EDAS فازی. پژوهشنامه مطالعات مدیریت و بهره‌وری، ۱ (۱)، ۲۱-۱.



© نویسنده‌گان.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmeps.2024.141669.1006>

ناشر: دانشگاه کردستان

۱. پیشگفتار

در شرایط محدودیت‌های ناشی از وجود تحریم گزینش بهترین سیاست نگهداشت، نقش بسزائی در کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و کاهش ریسک سازمان‌های تجهیز-محور دارد. در این مقاله یک رویکرد مناسب برای گزینش سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات، با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی به روش EDAS فیزیکی برای کمپرسور؛ یکی از مهمترین دارایی صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، ارائه شده است.

فعالیت‌های نگهداشت کمپرسورها، مانند سایر تجهیزات صنعتی، در چند بخش، نخستین بخش مربوط به طبقه‌بندی استراتژی مدیریتی و نگاه کلی به تجهیزات می‌شود. در بخش دوم، دیدگاه تفصیلی نگهداشت کمپرسورها، به رویکردها و برنامه‌ریزی‌های دقیق آن اشاره می‌کند. در نهایت در بخش سوم، در زمینه نگهداشت کمپرسورها به جنبه‌های فنی و بازرسی‌های دوره‌ای توجه می‌شود. در این پژوهش، بهترین سیاست‌های نگهداشت برای کمپرسور بر پایه کمینه کردن شاخص‌های ریسک؛ شامل احتمال و پیامدهای خرابی، کمینه می‌گردد. همچنین، در راستای استفاده از روش تحلیل ریسک FMEA^۱، همزمان شاخص شناسائی خرابی نیز بهبود می‌یابد.

از آنجا که در کاربردهای دنیای واقعی، داده‌های آماری دقیق و کامل نیستند، در این مقاله، با ادغام این داده‌ها با قضاوت‌های ذهنی و ادراک غیردقیق که با مجموعه‌ها و اعداد فازی بیان شده‌اند، کارایی این اطلاعات برای ارزیابی، تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری افزایش می‌یابد. علاوه بر موارد ذکر شده وجه تمایز دیگر این پژوهش با پژوهش‌های گذشته عبارتند از:

(۱) ارائه یک کاربرد عملی برای گردآوری نظر خبرگان و تبدیل آن‌ها به شاخص‌های محاسباتی برای اعمال در رویکردهای

تصمیم‌گیری

(۲) ارائه یک کاربرد عملی از روش‌های تعیین احتمال، پیامد و امکان شناسائی مدهای خرابی تجهیزات

(۳) ارائه رویکرد تصمیم‌گیری مناسب برای رتبه‌بندی سیاست‌های نگهداشت با استفاده از داده‌های فازی

یکی از مهم‌ترین مفاهیم مدیریت در صنایع بزرگ تعریف نگهداشت^۲ است. در زبان فارسی به صورت مخفف به نگهداشت یا نگهداری و تعمیرات، نت گفته می‌شود. نگهداشت مجموعه‌ای از فعالیت‌ها و عملکردهایی است که مأموریت عملیاتی حفظ قابلیت عملیاتی دستگاه‌ها، ماشین‌آلات و تجهیزات را دارند امروزه نگهداشت یک تجهیز یعنی طرح‌ریزی و انجام فعالیت‌هایی بر روی تجهیزات که باعث عملکرد مستمر تجهیز برای تولید محصول یا خدمات با کیفیت را مهیا سازد. مبانی اصلی نگهداری از یک تجهیز پیشگیرانه است و اگر نیاز شد به تعمیر^۳ آن پرداخته می‌شود. اهداف اصلی نگهداشت بیشینه کردن دوره عمر، قابلیت اطمینان، کارایی کلی ماشین‌آلات و تجهیزات و کمینه کردن تعمیرات اتفاقی، هزینه‌های توقفات ماشین‌آلات و تجهیزات هستند. برخی از مهمترین رویکردهای نگهداشت عبارت‌اند از:

- نگهداشت اضطراری (EM^۴)
- نگهداشت برنامه‌ریزی شده^۵
- نگهداشت پیشگیرانه (PM^۶)
- نگهداشت اصلاحی (CM^۷)
- نگهداشت مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM^۸)
- نگهداشت پیش‌بینانه (پیشگویانه - PdM^۹) یا پایش وضعیت (CM^{۱۰})
- نگهداشت بهره‌ور فراگیر (TPM^{۱۱} ژاپنی)

1. Failure Modes and Effects Analysis

2. Maintenance

3. Repair

4. Emergency Maintenance

5. Planned Maintenance

6. Preventive Maintenance

7. Corrective Maintenance

8. Reliability Centered Maintenance

9. Predictive Maintenance

10. Condition Monitoring

11. Total Productive Maintenance

• نگهداشت بهره‌ور (PM¹ آمریکایی)

قابلیت اطمینان^۲ تجهیزات یک مفهوم جامع برای نشان دادن توانایی آن‌ها در عمل به کارکردهای خواسته شده از آن‌ها است. از منظر محاسباتی، اگر یک محصول در زمان صفر در حال کارکرد بدون نقص باشد، قابلیت اطمینان به صورت احتمال تداوم این کارکرد، بدون بروز خرابی، در یک دوره مشخص و تحت شرایط استاندارد بهره‌برداری است. به تعبیری دیگر، می‌توان قابلیت اطمینان را احتمال موفقیت در یک بازه زمانی مشخص لقب داد، که متمم احتمال خرابی دارایی یا فرآیند در آن بازه خواهد بود. ریسک و قابلیت اطمینان دو مفهوم مرتبط هستند. استاندارد ISO 9001:2015 ریسک را عدم قطعیت تعریف کرده است که با رویدادهای بالقوه در ارتباط بوده و آن را معمولاً با نتیجه حاصلضرب شاخص‌هایی از احتمال و پیامد چنین رویدادی بیان می‌کند. مدیریت ریسک درست، با کنترل رخدادهای آینده، از خطرات احتمالی پیش‌گیری می‌کند.

قطعاً ریسک‌ها و خطرات در فرآیند نگهداری و تعمیرات، مانند سایر فرآیندهای یک سازمان اثرات منفی داشته و به‌طور بالقوه می‌توانند بر دستیابی به اهداف نگهداشت و سازمان تأثیر بگذارند. استاندارد ISO 9001 ویرایش 2015 تحلیل ریسک را برای کلیه فرآیندهای سازمان ضروری دانسته و نتیجه آن اطمینان بیشتر از نتایج تصمیم‌گیری‌ها در راستای اهداف سازمانی و الزامات ذینفعان است. مدیریت ریسک یک فرآیند مستمر در نگهداشت، شامل شناسایی و کاهش ریسک‌های احتمالی و برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری درست در جهت مقابله با آن‌ها است. ریسک‌های موجود در نگهداشت، با توجه به ۳ زیرفرآیند نگهداشت مطابق با استاندارد EN17007 یعنی مدیریت، تحقق یا عملیات و پشتیبانی تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین این تقسیم‌بندی را می‌توان مطابق با چارچوب مدیریت نگهداشت، بر اساس سند انجمن جهانی مدیریت نگهداشت و مدیریت دارایی با توجه به هفت جزو اصلی نگهداشت یعنی الزامات، مدیریت نگهداشت، مدیریت استراتژی نگهداشت، عملیات و اجرای نگهداشت و تخصیص منابع، موارد قابل تحویل و همچنین ارزیابی و بهبود مستمر دانست. برای مدیریت بهتر ریسک در نگهداشت باید اقدامات زیر در جهت مدیریت و کاهش ریسک انجام شود:

- تجزیه و تحلیل و ارزیابی حساسیت ریسک‌ها در سازمان.
- تعریف روندی مشخص برای انجام برنامه‌ریزی و زمان‌بندی و همچنین طراحی فرآیند گردش کار.

همچنین کمپرسورها با کاهش حجم و افزایش فشار سیالات، به ویژه گازها نقش مهمی در صنایع فرآیندی دارند؛ بنابراین، لازم است که تصمیمات و اقداماتی برای پیشگیری خرابی آن‌ها انجام گیرد، چرا که خرابی موجب توقف تولید می‌گردد. دلایل مختلفی خرابی کمپرسورها عبارتند از: ساییدگی و فرسودگی طبیعی، قطعات، مواد مصرفی و خنک‌کننده‌های غیراستاندارد، پیری و خستگی مکانیکی، تعمیر و نگهداری ضعیف، افزایش بار بیش از ظرفیت و نصب اشتباه.

۱-۱. پژوهش‌های مرتبط با تحلیل ریسک در صنایع فرآیندی

در این بخش، خلاصه مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در رابطه با تحلیل ریسک در صنایع فرآیندی، با روش‌های عمومی مدیریت ریسک ارائه می‌شوند. افشار کاظمی و همکاران مدلی برای پیش‌بینی ریسک‌های بحرانی و اولویت‌دار، بر پایه الگوریتم‌های داده‌کاوی با توجه به نقش مهم رویکردهای پیش‌بینانه در کاهش هزینه‌های نگهداری تعمیرات ارائه دادند. (AfsharKazemi & Asgharizadeh, 2023).

روش داده‌کاوی پژوهش بر اساس روش CRISP طرح‌ریزی شده و مدل‌سازی داده‌ها بر پایه داده‌کاوی «توصیفی» و «پیش-بینی» و استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی و طبقه‌بندی بود. در این پژوهش، یک الگوریتم ترکیبی پیش‌بینی به‌صورت تکاملی به کارگرفته و بر اساس نتایج، ۱۳ ریسک، بحرانی تشخیص داده شد، که در این میان «انتشار گازهای آلاینده و مواد شیمیایی» و «عدم آموزش و توجه نبودن پیمانکاران نسبت به موقعیت شبکه» به‌ترتیب بیشترین و کمترین اولویت را داشتند. شریفی و همکاران با هدف شناسایی خطرات بالقوه و شبیه‌سازی پیامدهای حوادث احتمالی ناحیه مخازن و فلر پالایشگاه گاز ایلام، از روش ETBA

و نرم‌افزار PHAST استفاده کردند (Sharifi & Razavian, 2020). با روش ETBA خطرات ناحیه مخازن و فلر پالایشگاه ایلام را بررسی و ۸ ریسک در محدوده غیر قابل قبول را شناسایی کردند. پیامد این ریسک‌ها برای سناریوهای منتخب شامل تشعشع ناشی از آتش، فشار ناشی از انفجار و ریزش مواد سمی شناسایی شده و با نرم افزار PHAST شبیه‌سازی گردید. از نتایج این مطالعه پیشنهاداتی برای بازنگری سیستم‌های اطفای حریق، پایش مداوم صاعقه گیرها و برگزاری مانورهای آتش نشانی بود. بررسی‌ها حاکی از گستردگی کاربرد روش FMEA در بررسی انواع مختلف ریسک‌ها در صنایع فرآیندی است. نخعی‌نژاد و صفاری با هدف معرفی چارچوب مناسبی برای شناسایی ریسک‌های تکنولوژی شرکت‌های گاز و اولویت‌بندی آنها از تکنیک تلفیقی FMEA-TOPSIS استفاده کردند (Nakhaeinejad & Safari, 2019). شاخص‌های شناسایی شده در قالب کاربرد FMEA قرار داده شده و به ۳۳ نفر از خبرگان و پیمانکاران صنعت گاز ارسال و پس از امتیازدهی به ریسک‌ها در قالب کاربرد FMEA، به جای محاسبه عدد RPN، تکنیک TOPSIS برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شد. افشارنیا و مرزبان عوامل تأخیر در انتقال نیشکر به کارخانه تسویه را بررسی کردند (Afsharnia & Marzban, 2019). آن‌ها پس از بررسی عوامل تأخیر شامل خرابی کارخانه، خرابی تراکتورهای در صف، تصادف و واژگونی آن‌ها و تغییر شیفت، با استفاده از روش FMEA-ANP مشخص کردند که خرابی کارخانه مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل تأخیر در عملیات انتقال نیشکر به کارخانه بوده و نتیجه حاصل آن بود که با پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در کارخانه و به‌خصوص در بخش آسیاب می‌توان انتظار داشت که تا حد قابل توجهی بتوان از توقفات احتمالی پیشگیری کرد. محمد شاکری و همکاران یک رویکرد کاربردی برای تعیین استراتژی نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر دستگاه ارائه دادند که با استفاده از روش FMEA فازی و طراحی سیستم استنتاج فازی، ریسک شکست‌های مهم دستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت (shakeri kenari & Safaei Ghadikolaei, 2019). با تلفیق نتایج، استراتژی نگهداری و تعمیرات مناسب هر دستگاه تعیین گردید.

با توجه به اهمیت کمپرسورها در صنایع فرآیندی، پژوهش‌های بسیاری در خصوص نگهداری و تعمیرات و قابلیت اطمینان این تجهیزات انجام گرفته که غالب آن‌ها از دیدگاه فنی معطوف به شناسایی انواع خرابی‌ها و دلایل این خرابی‌ها بوده است. نوردال و همکاران یک ماتریس ارزیابی نگهداری و تعمیر پیشگویانه (PdM^2) را برای تشخیص قابلیت و پوشش، شناسایی نوع خطا، مکان و شدت آن‌ها پیشنهاد کرده و برای کمپرسور گریز از مرکز آزمون کردند (Nordal & El-Thalji, 2021). جوزف راک و همکاران تأثیر پارامترهای خاص مانند شکل پره‌های اسکرول، فشار تخلیه و سرعت چرخش کمپرسور اسکرول را بر روی تعادل حرارتی داخل یک محفظه تحلیل و یک مدل عددی دو بعدی از جریان ناپایدار شامل نشتی بین محفظه و یک روش تغییر شکل شبکه عددی ویژه پیشنهاد نمودند (Rak & Pietrowicz, 2020). جین هوا لانگا و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی عددی، تأثیر روش‌های مختلف دیوار انتهایی پروفیل شده (PEW^*) را بر عملکرد و محدوده کاری کمپرسورهای گریز از مرکز، را نشان داده و با مقایسه داده‌های تجربی، محدوده عملکرد کمپرسور را به طور قابل توجهی افزایش دادند (Lang & Galloway, 2021). جیان جی ژانگ و همکاران با استفاده از مدل‌های ریاضی و روش‌های شبیه‌سازی عددی ظرفیت کمپرسور را با کنترل جریان ورودی، ذخیره انرژی مازاد و همچنین بسته شدن شیر مکش با تأخیر، کنترل نموده و نشان دادند که این امر باعث جلوگیری از عملکرد ناکارآمد و اتلاف زیاد انرژی در کمپرسور رفت و برگشتی می‌شود (Sun Wang & Qi, 2021). مارتا زاگوروسکا و همکاران چارچوبی را برای بهینه‌سازی عملکرد در یک ایستگاه کمپرسور ارائه کردند. مطالعه موردی تأیید کرد که می‌توان با تنظیم شرایط عملیاتی ایستگاه کمپرسور، خرابی را به حداقل رساند (Zagorowska, Skourup & Thornhill, 2020). جی چن لی و همکاران تأثیر تغییر شکل قطعات، هنگام استفاده از گاز پروپان در دمای بالا بر عملکرد یک کمپرسور چرخشی را با نرم افزار شبیه‌سازی عملکرد نشان دادند. (Wu & Li, 2021)

کانگالا راجو و همکاران طرح یک کمپرسور را با استفاده از تعداد کمتری ترانزیستور ارائه کرده و همچنین عملکرد آن با پارامترهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (Bhavani, Raju, K, & Nagedram, 2021). آن‌ها دریافتند که سیستم پیشنهادی عملکرد بسیار خوبی در تمامی شرایط شبیه‌سازی شده دارد. لی و همکاران سایش پوش یا تاقان شاتون را در یک کمپرسور رفت و برگشتی که یکی از تجهیزات کلیدی در زمینه صنعتی فرآیند بود، بررسی کردند (Li, Liu & Zhang, 2021).

1. Energy Trace and Barrier Analysis
2. predictive maintenance
3. Profiled End Wall

آن‌ها روش‌هایی جهت شناسایی خرابی این اجزاء توسعه دادند. ژاو لینگ یو و همکاران مسئله ارتعاش بیش از حد مبدل حرارتی خنک‌شده با هوا در کمپرسور رفت و برگشتی با سرعت متغیر را مورد بررسی قرار داده و در نهایت مشکل حل شد (Ye, Yu, Fan & Wang, 2021). آن‌ها نتیجه گرفتند که تجزیه و تحلیل و آزمایش ارتعاش مبدل حرارتی خنک شده با هوا و انجام اقدامات ضد لرزش برای اطمینان از عملکرد ایمن کمپرسور بسیار مهم است. جی ژانگ هاو و همکاران قابلیت اطمینان عملیاتی و عمر خستگی تجهیزات مکانیکی برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های مکانیکی را بررسی کردند (Zhenghao, Congrui & Demin, 2021). علی مددی و همکاران یک روش خودکار برای بهینه‌سازی طراحی سه بعدی پروانه کمپرسورگریز از مرکز فراصوتی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تکنیک حل‌کننده CFD^1 (دینامیک سیالات محاسباتی) ارائه کردند (kradi & Madadi, 2020). متیوز اوالد هنگام بررسی تهدیدات عمده برای قابلیت اطمینان عملکرد کمپرسور متقابل، دریافت که روش‌های نگهداری غیر استاندارد و از دست دادن راندمان عملیاتی تأثیرات منفی عمیقی بر هزینه‌های کل چرخه عمر داشته و باعث کاهش سودآوری کلی می‌شود. (Matthews Ewald, 2021) وی اهمیت کارایی عملیاتی و تأثیر آن بر هزینه‌های چرخه عمر کل و سودآوری کل را نشان داد. نوید شریفی و همکاران عملکرد کمپرسورهای بخار را با استفاده از یک فرمول دو سیال، برای شبیه‌سازی جریان بخار در داخل کمپرسورهای بخار حرارتی، براساس تئوری تراکم غیر تعادلی در جریان بخار مرطوب مافوق صوت، بررسی کردند (Sharifi Abadi, & Kouhikamali, 2021). آن‌ها فعل و انفعالات بین فازهای مایع و بخار را به طور کامل، از طریق مقایسه تغییرات در نرخ هسته، شعاع قطرات، تعداد قطرات و غیره ارزیابی کردند. کاوازینی و همکاران با استفاده از استراتژی طراحی نوآورانه و با هدف به حداکثر رساندن کارایی ماشین با بهینه‌سازی توپولوژی ارائه کردند. بایک روش مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^2) ادغام شده با دینامیک سیالات (CFD) برای دستیابی به حداکثر کارایی بهینه استفاده کردند (Cavazzini, Casari & Montomoli, 2020). پتروسکو و همکاران روشی نوآورانه را برای کاهش هزینه‌های بالای ساخت قطعات کمپرسورهای تخلیه فشار بالا با ترانس‌های بسیار کم، با استفاده از تکنولوژی پوشش مدرن ارائه دادند (Nitulescu, Petrescu & Tomescu, 2021). علیرضا جهانگیری و همکاران پتانسیل استراتژی‌های تراکم هم‌دم را با معرفی دو رویکرد مدل‌سازی برای تحلیل وابسته به زمان کمپرسورهای رفت و برگشتی بررسی و یک مدل ترمودینامیکی بر اساس پایستگی جرم و انرژی برای مکانیزم میل لنگ توسعه داده و سیستم معادلات دیفرانسیل حاصل را با نرم‌افزار MATLAB حل کردند (Jahangiri & Bustanchy, 2020).

۲. بیان مساله

هر ساله به دلیل عدم آگاهی با روش‌های نگهداشت تجهیزات و بی‌توجهی به امر نت، خسارات زیادی به تجهیزات صنایع وارد می‌شود. بیشتر فعالیت‌های نگهداشت بر اساس توصیه‌های ارائه شده توسط فروشنده تجهیزات انجام می‌شود و چون این توصیه‌ها براساس تجربه شکل گرفته‌اند ممکن است بکارگیری این دستورالعمل‌ها در مکان‌ها و زمان‌های مختلف فرق کند. بنابراین به جهت بالابردن راندمان، بهبود بهره‌وری، ایمنی و افزایش طول زندگی مفید تجهیزات، گزینش بهینه سیاست نگهداشت باید به درستی انجام شود. در این مقاله مسئله گزینش سیاست بهینه نگهداشت با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی مورد نظر قرار گرفته و یک رویکرد مناسب برای آن ارائه شده‌است.

فعالیت‌های نگهداشت کمپرسورها، مانند سایر تجهیزات مهم صنعتی، در چند بخش طبقه‌بندی می‌شود. بخش نخستین مربوط به بخش استراتژی مدیریتی که نگاه کلی به تجهیزات دارد. در بخش دوم، دیدگاه تفصیلی نگهداشت کمپرسورها، رویکردها و برنامه‌ریزی‌های. در نهایت در بخش سوم، به جنبه‌های فنی و بازرسی‌های دوره‌ای می‌پردازد. یکی از اهداف این مقاله، ارائه یک تعریف جامع از سیاست‌های نگهداشت در چارچوب مدیریت دارایی‌های فیزیکی از دیدگاه‌های مختلف، بررسی رویکردهای نگهداشت، معرفی تجهیزات مهم و ارائه تعاریف کلمات کلیدی و در مجموع ارائه یک دیدگاه جامع از سیاست‌های نگهداشت می‌باشد. در ادامه، یک رویکرد علمی و دارای کاربرد عملی برای گزینش بهترین سیاست نگهداشت تجهیزات حساس، ارائه می‌گردد. این رویکرد به عنوان نمونه موردی، برای کمپرسورهای فرآیندی مورد استفاده در واحد یوتیلیتی شرکت پتروشیمی ایلام اجرا می‌گردد.

1. computational fluid dynamics

2. Particle Swarm Optimization

۳. روش پژوهش

این پژوهش با استفاده از منابع علمی، مستندات فنی، سوابق خرابی تجهیزات و نظر خبرگان به بررسی حالات ممکن خرابی و راهکارهای پیشگیری از آن‌ها می‌پردازد. سپس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، این راهکارها را اولویت‌بندی می‌کند. معیارهای رتبه‌بندی اولیه احتمال، پیامد و امکان شناسایی خرابی‌ها هستند که مفاهیم آن‌ها از روش FMEA اقتباس شده‌اند. سپس، این معیارها در قالب شاخص RPN جمع شده و در کنار معیارهای هزینه راهکارها و میزان اطمینان از ثمربخشی راهکارها، برای رتبه‌بندی راهکارهای پیشگیری استفاده می‌شوند. در تعیین راهکارهای پیشگیری از خرابی کمپرسورها و تاثیر آن‌ها بر معیارهای تصمیم‌گیری از نظرات کارشناسان واحدهای فنی استفاده شده است.

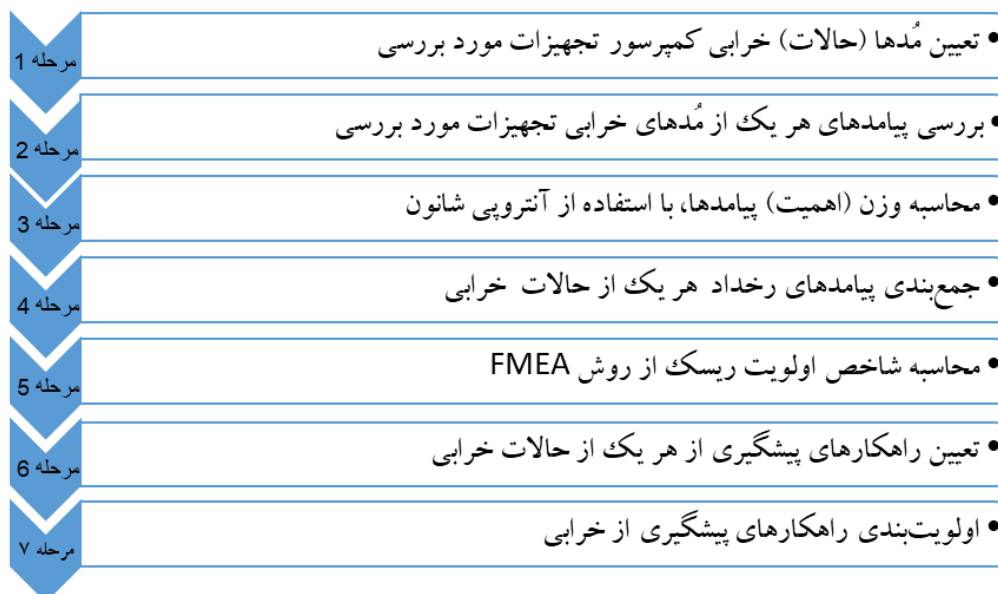
جامعه آماری و نحوه انتخاب آن‌ها: با توجه به اینکه واحد سرویس‌های جانبی (یوتلیتی) تامین کننده هوا، برق و آب مورد نیاز سایر واحدهای پتروشیمی می‌باشد. از این رو برای تهیه هوا، نیازمند تجهیزات حساسی به نام کمپرسور می‌باشد. به همین دلیل نگهداری و تعمیرات این تجهیز حساس اهمیت خاصی دارد و بر این اساس، این مقاله به دلیل اهمیت و استراتژیک بودن این تجهیز ارائه شده است.

خبرگان:

ردیف	سمت	تحصیلات	سابقه (سال)	توضیحات
۱	کشیک ارشد مجتمع	لیسانس مهندسی شیمی	۱۶	
۲	مسئول واحد هوا یوتلیتی	فوق لیسانس مهندسی شیمی	۱۰	بهره بردار کمپرسورهای هوا
۳	کارشناس ارشد تجهیزات حساس	فوق لیسانس مکانیک	۸	سرپرست تجهیزات حساس - بخش کمپرسورها
۴	سرپرست مکانیک ماشینهای دوار و حساس (پیمانکار)	لیسانس مکانیک	۲۵	کمپرسور جزء تجهیزات حساس محسوب می‌شود
۵	کارشناس ارشد ماشینری	لیسانس مکانیک	۱۲	متخصص کمپرسور
۶	کارشناس ماشینری	فوق دیپلم	۱۵	متخصص کمپرسور

در شکل زیر مراحل روش پژوهش نشان داده شده است که در ادامه هر مرحله به تفکیک شرح داده می‌شود:

شکل ۱: شکل مراحل روش پژوهش



مرحله ۱: تعیین حالات (مُد‌های) خرابی کمپرسور

در رویکرد پیشنهادی، نخست، حالات (مُد‌های) خرابی بحرانی این تجهیزات مشخص شده و شاخص‌هایی برای فراوانی، شدت پیامدها و امکان شناسائی هریک تعریف می‌شود. حالات خرابی بحرانی حالاتی هستند که رخداد هر یک از آن‌ها، برای هر تجهیز، موجب توقف عملکرد آن تجهیز می‌شود. نحوه گزینش این مُدهای خرابی براساس سابقه و پرونده تعمیراتی تجهیزات و استاندارد OREDA بوده است.

مرحله ۲: بررسی پیامدهای هر یک از مُدهای خرابی تجهیزات

در این مرحله بررسی و تعیین پیامدهای هر حالت خرابی به همراه راهکارهای پیشگیرانه و محدودکننده خرابی مشخص می‌شوند.

مرحله ۳: محاسبه وزن (اهمیت) پیامدها با استفاده از آنتروپی شانون

پیامدهای خرابی ممکن است از نوع هزینه‌ای، تاثیر زیست محیطی، ایمنی و یا موارد دیگر باشند. ممکن است اهمیت این پیامدها متفاوت باشد. هنگامی که امکان دسترسی به نظر تصمیم‌گیرندگان وجود نداشته باشد، و یا نتوان توافقی در این مورد بین آن‌ها ایجاد نمود، از روش آنتروپی شانون برای تخمین این وزن‌ها استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ذینفعانی که تحت تاثیر پیامدهای خرابی کمپرسور قرار می‌گیرند بسیار است، برای پژوهشگر گردآوری نظر همه آن‌ها امکانپذیر نیست و همچنین گردآوری نظرات برخی از ذینفعان اعتبار چندانی ندارد. به همین سبب، تصمیم بر آن شد که برای محاسبه وزن پیامدها در این پژوهش از روش وزن‌دهی آنتروپی شانون استفاده شود که در ادامه، گام‌های آن توضیح داده می‌شوند.

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم به صورت زیر:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

که در آن x_{ij} میزان شدت پیامد j ، $(j=1,2, \dots, n)$ برابر رخداد مُد خرابی i ، $(i=1,2, \dots, m)$ است.

گام دوم: نرمال کردن ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه زیر:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_j x_{ij}}$$

گام سوم: محاسبه آنتروپی هر شاخص (E_j) ، به صورت زیر، که در آن، a تعداد گزینه‌ها است:

$$k = \frac{1}{\ln(a)}$$

همچنین، K یک عدد ثابت وابسته به تعداد گزینه‌ها است که مقدار E_j را بین ۰ و ۱ نگه داشته و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_j = -k \sum_i (n_{ij} * \ln(n_{ij}))$$

گام چهارم:

محاسبه مقدار d_j (درجه انحراف) از رابطه زیر:

$$d_j = 1 - E_j$$

گام پنجم:

محاسبه وزن پیامد از رابطه زیر:

$$d_j = \frac{1}{\sum_j d_j}$$

مراحل ۴ و ۵: جمع‌بندی پیامدهای رخداد خرابی و محاسبه شاخص اولویت ریسک

جمع‌بندی پیامدهای رخداد هر حالت خرابی با افزودن ستون‌های هفتم و هشتم به جدول زیر انجام می‌شود:

جدول ۱: جدول پیامدهای رخدادهای خرابی و محاسبه شاخص اولویت ریسک از روش FMEA

(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)			(۷)	(۸)
تعداد تجهیزات		حالت خرابی			پیامدهای خرابی			جمع‌بندی پیامدها	
تعداد کل تجهیزات	سرویس	تعداد تجهیزات	۱	۲	۳	۴	۵	پیامد کلی	تعداد کل
N1	N2	n1							
			n2						
				n3					

در این جدول، ستون هفتم مربوط به جمع‌بندی پیامدهای خرابی مورد نظر برای هر یک از تجهیزات می‌باشد. همچنین، ستون هشتم عدد ثبت شده در ستون هفتم، مربوط به پیامدها را از طریق تقسیم هر یک از آن‌ها بر مجموع پیامدها، و سپس ضرب آن در عدد ۱۰، در بازه ۰ تا ۱۰ نرمال می‌کند. شاخص اولویت ریسک (RPN)، برای هر مد خرابی، در روش FMEA، از حاصل ضرب سه عدد؛ مشخص‌کننده شدت، فراوانی و عدم قابلیت شناسایی آن خرابی، به دست می‌آید. در رویکرد پیشنهادی نیز، پس از تعیین پیامد هر مجموعه حالات خرابی، نیاز به محاسبه فراوانی، شدت پیامد و دشواری شناسایی آن حالات خرابی است. دسترسی به اطلاعات کمی برای تقریب دقیق این اطلاعات امکانپذیر نیست، به همین دلیل این مقادیر برطبق روش FMEA، با تخصیص اعداد ۱ تا ۱۰ با نظر خبرگان، مشخص می‌شوند. جداول استاندارد برای این منظور در دسترس هستند.

مرحله ۶: تعیین راهکارهای پیشنهادی

پس از بررسی منابع و مستندات فنی و کسب نظرات کارشناسان و خبرگان در پتروشیمی ایلام راهکارهای پیشگیری از خرابی، در قالب مجموعه‌ای از فعالیت‌های دوره‌ای که می‌توانند فراوانی یا شدت پیامدهای خرابی و یا امکان شناسایی را برای یک یا تعدادی از حالات خرابی بحرانی را بهبود بخشند، معین شد. در ادامه، خبرگان فاصله زمانی و منابع مورد نیاز برای انجام هریک از این راهکارها را مشخص کردند.

ردیف	دلایل خرابی	راهکار	بازه زمانی (ماه)	تعداد در سال	هزینه هر بار اجرا (از ۱ تا ۱۰ افزایشی)	هزینه سالانه	آثار فراوانی	آثار شدت	آثار شناسایی
M1									

مرحله ۷: رتبه‌بندی راهکارهای پیشنهادی

در این پژوهش از روش آیداس برای رتبه‌بندی راهکارهای پیشنهادی از خرابی کمپرسورها استفاده شده که در ادامه، هر گام شرح داده می‌شود.

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم

$$X = [X_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix}$$

گام دوم: محاسبه میانگین راه حل معیارها

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}}{n}$$

گام سوم: محاسبه PDA^۱ و NDA^۲

با استفاده از روابط زیر مقادیر فاصله مثبت از میانگین (PDA) است و فاصله منفی از میانگین (NDA) را در دو حالت محاسبه می‌کنیم. حالت اول: اگر معیار جنبه مثبت (افزایش معیار باعث سود گردد) داشته باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j}$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j}$$

حالت دوم: اگر معیار جنبه منفی (کاهش معیار باعث سود گردد) داشته باشد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j}$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j}$$

گام چهارم: محاسبه مقادیر SP^۳ و SN^۴

$$SP_i = \sum_{j=1}^m w_j PDA_{ij}$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^m w_j NDA_{ij}$$

گام پنجم: محاسبه مقادیر نرمال SP و SN

در این گام با استفاده از روابط زیر مقادیر SP و SN که در مرحله قبل محاسبه شد را نرمال می‌کنیم:

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)}$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)}$$

گام ششم: رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

در پایان، با استفاده از رابطه زیر امتیاز نهایی گزینه‌ها را محاسبه و سپس آن‌ها را رتبه‌بندی می‌کنیم.

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i)$$

1. Positive Distance from Average
2. Negative Distance from Average
3. sum of positive
4. sum of negative

روش ایداس

تکنیک ایداس (EDAS) به معنی ارزیابی گزینه‌ها بر اساس فاصله آن‌ها از راه حل میانگین می‌باشد. این تکنیک اولین بار توسط مهدی کشاورز قرابایی و همکاران در سال ۲۰۱۵ ارائه شد در ادامه در سال ۲۰۱۶ کشاورز همراه با زاوادیسکاس، امیری و زنوناس این روش را به صورت فازی ارائه کردند (Keshavarz Ghorabae, 2015). روش EDAS فازی در دسته تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی و در حوزه کاربرد منطق فازی در مدیریت قرار می‌گیرد.^۲

در این روش دو معیار برای ارزیابی مطلوب بودن گزینه‌ها در نظر گرفته می‌شوند؛ اولین معیار فاصله مثبت از میانگین (PDA)^۳ و دومین معیار فاصله منفی از میانگین (NDA)^۴ است. گام‌های مربوط به این روش به شرح زیر هستند:

- گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم
- گام دوم: محاسبه میانگین راه حل معیارها
- گام سوم: محاسبه PDA و NDA
- گام چهارم: محاسبه مقادیر SP و SN
- گام پنجم: محاسبه مقادیر نرمال SP و SN
- گام ششم: رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

روش FMEA^۵

استفاده از روش حالت شکست و تجزیه و تحلیل پیامد (FMEA) به سازمان‌ها اجازه می‌دهد تا تمام شکست‌های احتمالی در یک فرآیند را در مراحل اولیه پیش‌بینی کنند. بسیاری، FMEA را یکی از ابزارهای شش سیگما می‌دانند. این روش در دهه ۱۹۵۰ توسعه یافت و یکی از اولین روش‌های ساختاریافته و گام‌به‌گام بهبود قابلیت اطمینان بوده و برای شناسایی تمام خرابی‌های احتمالی در یک طراحی، فرآیند تولید و مونتاژ به کار می‌رود. FMEA را به عنوان یک ابزار رایج تجزیه و تحلیل فرآیند می‌شناسیم. هرگونه خطا یا نقصی در محصول یا خدمات را به عنوان شکست تعریف می‌کنیم؛ به ویژه مواردی که بر مشتری تأثیر می‌گذارد و حالت‌های شکست به معنی راه‌ها یا حالت‌هایی است که ممکن است در آن چیزی شکست بخورد. «تجزیه و تحلیل اثرات» به مطالعه پیامدهای شکست‌ها اشاره دارد.

در این روش شکست‌ها بر اساس میزان جدی بودن پیامدها، تعداد دفعات رخ دادن و اینکه چگونه می‌توان آن‌ها را شناسایی کرد، اولویت‌بندی می‌شوند. هدف FMEA این است که اقداماتی را برای حذف یا کاهش خرابی‌ها مطابق با اولویت‌بندی انجام دهد. این روش، به صورت کلی، از هفت مرحله زیر تشکیل شده است:

- برنامه‌ریزی و آماده‌سازی
- تجزیه و تحلیل ساختار
- تجزیه و تحلیل تابع
- تجزیه و تحلیل شکست
- تجزیه و تحلیل ریسک
- بهینه‌سازی
- مستندسازی نتایج

1. (Evaluation Based on Distance from Average Solution)
 2. Extended EDAS Method for Fuzzy Multi-criteria Decision-making: An Application to Supplier Selection
 3. Positive distance from Avarage
 4. Negative distance from Avarag
 5. Failure Modes and effective Analysis

نمونه موردی

در این بخش نتایج اعمال رویکرد پیشنهادی بر روی نمونه موردی مربوط به واحد یوتیلیتی پتروشیمی ایلام، شامل ۵ کمپرسور مشابه، ۴ کمپرسور اصلی و یک کمپرسور رزرو ارائه می شود.

مرحله ۱: تعیین حالات خرابی بحرانی و پیامدهای هر یک از آنها

با استفاده از استاندارد OREDA و نظرات خبرگان، ۵ عدد از مهمترین مدهای خرابی بحرانی، (۱) افزایش دما، (۲) وایبرشن، (۳) قطع جریان روغن، (۴) تعویض فیلتر هوا و (۵) کیپ شدن Air Trap، برای بررسی در این پژوهش انتخاب شدند. در این رابطه، حالات زیر قابل رخداد هستند:

هنگامی که همه کمپرسورها سالم باشند و یا اگر با خراب شدن یکی از این تجهیزات، ۳ کمپرسور اصلی دیگر کارکنند، با قراردادن کمپرسور پنجم در سرویس شرایط کافی برای ادامه کار سیستم فراهم می شود.

اگر حداقل ۲ عدد از آنها کارکنند و کمپرسور پنجم نیز در سرویس قرار گرفته باشد، شرایط لازم ولی بحرانی برقرار خواهد بود. این شرایط می تواند موجب کاهش تولید شده و همچنین با افزایش فشار بار بر روی کمپرسورهای فعال موجب استهلاک و افزایش ریسک خرابی آنها می شود.

اگر تنها یکی از آنها کار کند و به علاوه کمپرسور پنجم (Stand by) نیز در سرویس قرار گرفته باشد، آنگاه شرایط فوق بحرانی شده و باید مصرف هوای مورد نیاز در سایتها اولویت بندی شده و تنها تجهیزاتی که نیاز شدید به هوا داشته و در تولید نقش اصلی را دارند مورد استفاده قرار گیرند.

چنانچه در مجموع، تنها یک کمپرسور (اصلی و یا افزونه) در سرویس قرار گیرد، این امر منجر به توقف تولید می گردد، زیرا یک کمپرسور با وجود اولویت بندی انجام شده به تنهایی حتی قادر به تامین هوای تجهیزات اصلی نیز نخواهد بود. سایر محدودیت های تجهیزات مورد نظر به شرح زیر است:

در حالت اضافه بار^۱ کمپرسور بعد از ۳۰ ثانیه به صورت اتوماتیک متوقف^۲ شده و از سرویس خارج می شود.

جدول زیر پیامدهای خرابی کمپرسورها را با توجه به ظرفیت آنها را به صورت خلاصه، بیان می کند:

جدول ۲: پیامد خرابی کمپرسورهای واحد یوتیلیتی

تعداد در سرویس	وضعیت	پیامد	اقدامات انجام شده
۰	عدم تولید هوا	خسارت جدی و سنگین به تجهیزات زیادی در مجتمع	بدلیل سرعت زیاد افت فشار هوا (مخصوصاً ابزار دقیق) در خطوط لوله، مجالی برای تصمیم گیری باقی نمی ماند
۱	عدم تولید هوا	عدم تامین خواسته واحد فرآیند و توقف تولید	۱- اطلاع رسانی به واحد فرآیند با اولویت گذاری روی تخلیه مواد و با عملیات روی شیرهای حساس اقدام به خارج نمودن تجهیزات از سرویس جهت به حداقل رساندن خسارات ۲- قرار دادن مخزن هوای ابزار دقیق با فشار 50-60 بار به عنوان پشتیبانی در اختیار واحد فرآیند جهت بستن و باز کردن شیرهای کنترلی ۳- راه اندازی کمپرسور پنجم ۴- بستن کامل خروجی هوای سرویس ۵- بستن کامل ورودی واحد تولید هوای ازت
۲	با ظرفیت full load (۱۱۰۰۰-۱۲۰۰۰)	به دلیل افزایش ظرفیت، عمر تجهیز کاهش پیدا می کند و از طرفی باعث افزایش هزینه نگهداری و تعمیرات می گردد	۱- راه اندازی کمپرسور stand by (کمپرسور پنجم) با ظرفیت full load ۲- مدیریت مصرف. ۳- در صورت عدم راه اندازی کمپرسور پنجم اقدامات زیر انجام می شود: - قطع هوای غیر ضرور کل مجتمع - بستن ۱۰٪ کنترل ولو و هوای خروجی هوای سرویس (plant air) - خارج کردن واحد تولید هوای ازت

1. Over load

2. Trip

۳	با ظرفیت full load (۱۱۰۰۰-۱۲۰۰۰)	به دلیل افزایش ظرفیت، عمر تجهیز کاهش پیدا می‌کند و از طرفی باعث افزایش هزینه نتمی‌گردد	۱- راه‌اندازی کمپرسور stand by (کمپرسور پنجم) ۲- در صورت عدم راه‌اندازی کمپرسور پنجم، هوای سرویس قطع شود
۴	با ظرفیت ۱۰۰۰۰ load	تامین نیاز واحد فرآیند	—

مرحله ۲: تعیین پیامدهای هر یک از حالت خرابی

جدول مربوط به هزینه‌های تعمیراتی نیروی انسانی و مواد مصرفی پنج مد خرابی می‌باشد و این جدول بیانگر این است که اگر از مجموع پنج کمپرسور (کمپرسور شماره پنج در سرویس می‌باشد) یکی از آنها خراب شود. میزان هزینه تعمیراتی برای دو مورد فوق چقدر خواهد بود که جزئیات آن در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۳: جدول مدهای خرابی و هزینه تعمیر تجهیز

	W3	W2	W1		
ردیف	نوع خرابی	نیروی انسانی	مواد مصرفی و قطعات یدکی	جمع هزینه تعمیر*	نرمالایز شده
1	مد خرابی ۱				
2	مد خرابی ۲				
3	مد خرابی ۳				
4	مد خرابی ۴				
5	مد خرابی ۵				
جمع هزینه					

* هزینه‌ها از ۱ تا ۱۰ زیاد می‌شود.

اجزاء ستون ششم مربوط به پیامدهای مختلفی است که هر حالت خرابی کمپرسور ایجاد می‌کند. این خرابی به بخش‌های هزینه تعمیر تجهیز خراب، توقف تولید، پیامدهای زیست محیطی و مخاطرات ایمنی تقسیم می‌شوند. یکی از مهمترین پیامدهای خرابی، صرف هزینه تعمیر خرابی می‌باشد که شامل هزینه نیروی انسانی، هزینه مواد مصرفی و قطعات یدکی است.

جدول ۴: هزینه‌های تعمیراتی نیروی انسانی و مواد مصرفی

ردیف	کمپرسور در سرویس	افزایش دما	واپرشن	قطع جریان روغن	خرابی فیلتر هوا	کیپ شدن ابترپ	نوع خرابی	اعداد کمی نیروی انسانی	اعداد کمی مواد مصرفی و قطعات یدکی	جمع هزینه تعمیر*	نرمالایز شده
1	4	1					افزایش دما	3	3	6	0.012
2			1				واپرشن	3	1	4	0.008
3				1			قطع جریان روغن	3	2	5	0.010
4					1		تعویض فیلتر هوا	2	3	5	0.010
5						1	کیپ شدن Air Trap	3	2	5	0.010
جمع											
								۱۴	۱۱	۲۵	

مرحله ۳: محاسبه وزن (اهمیت) پیامدها با استفاده از آنتروپی شانون

نحوه محاسبه وزن پیامدهای خرابی براساس روش آنتروپی شانون در جداول زیر نشان داده شده است:

جدول ۵: محاسبه وزن (اهمیت) پیامدها با استفاده از آنتروپی شانون

معیارها			گزینه ها	
اطمینان	بهبود	هزینه		
0.083	1993.946	4.000	جت زنی	افزایش دما
0.750	1873.025	36.000	تعویض بیرینگ و انجام pm	
0.916	1907.811	12.000	بررسی و عملکرد تجهیز	
0.500	1847.518	24.000	رفع اشکالات قطع جریان	
0.750	1890.418	12.000	تعویض سر وقت فیلترها	
0.92	1221.67	8.00	علت نابالانس	وایبرشن
0.50	1368.72	6.00	تنظیمات تجهیزات حساس	
0.75	1306.07	36.00	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
0.92	1799.09	16.00	بازکردن پایپهای	قطع جریان روغن
0.75	1892.03	24.00	باز کردن پمپ	
0.50	1841.29	24.00	بررسی محل نشی روغن	
0.92	1513.83	16.00	فیلترهای با کیفیت	فیلتر هوا
0.75	1416.15	18.00	فاصله تعویض فیلتر	
0.25	1371.84	48.00	برطرف کردن آلودگی	
0.917	1295.08	15.00	تعویض کامل power	ایر ترپ
0.750	1273.93	24.00	بررسی علت درست کار نکردن سنسور	
0.500	1328.92	10.00	تعویض بورد	
0.007	0.073	0.012	جت زنی	افزایش دما
0.066	0.069	0.108	تعویض بیرینگ و انجام pm	
0.080	0.070	0.036	بررسی و عملکرد تجهیز	
0.044	0.068	0.072	رفع اشکالات قطع جریان	
0.066	0.070	0.036	تعویض سر وقت فیلترها	
0.080	0.045	0.024	علت نابالانس	وایبرشن
0.044	0.050	0.018	تنظیمات تجهیزات حساس	
0.066	0.048	0.108	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
0.080	0.066	0.048	بازکردن پایپهای	قطع جریان روغن
0.066	0.070	0.072	باز کردن پمپ	
0.044	0.068	0.072	بررسی محل نشی روغن	
0.080	0.056	0.048	فیلترهای با کیفیت	فیلتر هوا
0.066	0.052	0.054	فاصله تعویض فیلتر	
0.022	0.051	0.144	برطرف کردن آلودگی	
0.080	0.048	0.045	تعویض کامل power	ایر ترپ
0.066	0.047	0.072	بررسی علت درست کار نکردن سنسور	
0.044	0.049	0.030	تعویض بورد	

برای نرمال‌سازی، هر داده را بر مجموع آن داده تقسیم کرده و مقدار ضریب k را از طریق فرمول (۱۸) بدست می‌آوریم.

$$K = \frac{1}{\ln(\text{تعدادگزینه})} = ۳۵۳.۰$$

جدول ۶: محاسبه وزن پیامدهای خرابی براساس روش آنتروپی شانون

معیارها			گزینه ها
اطمینان	بهبود	هزینه	
0.036	0.192	0.053	جت زنی

چهار سطر پایینی جدول فوق محاسبات روش آنتروپی شانون را برای وزن دهی مشخصات راهکارها نشان می‌دهد. همچنین، وزن‌های محاسبه شده برای معیارهای هزینه، بهبود و اطمینان راهکارها که از طریق آنتروپی شانون محاسبه شده‌اند در جدول زیر نشان داده شده است:

ردیف	وزن	معیار	توضیحات
۱	0.636	هزینه	
۲	0.058	بهبود	
۳	0.306	اطمینان	
	1.000	جمع	

اولین سطر جدول فوق مربوط به حالتی است که یک کمپرسور خراب باشد. در این حالت مقادیر هر یک از ستون‌های جدول به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

RPN(16)			
سختی شناسائی (۱۵)			
فراوانی (۱۴)			
نرمالیزه شده (۱۳)		کل پیامد	
جمع وزنی پیامدها (۱۲)			
محیط زیست (۱۱)		پیامد	
		0.327	0.180
ریسک (۱۰)		0.493	0.203
توقف تولید (۹)			
تعمیر (۸)			
نوع خرابی (۷)			
کیپ شدن ایرتپ (۶)			
خرابی فیلتر هوا (۵)			
قطع جریان روغن (۴)			
ارزش (۳)			
افزایش دما (۲)			
تعداد کمپرسور در سرویس (۱)			

34.80	8	4	1.088	0.004	0.002	0.002	0.001	0.012	افزایش دما (۴)					1	4
49.22	4	8	1.538	0.006	0.006	0.009	0.001	0.008	وایبرشن (۴)				1		
65.94	5	5	2.638	0.010	0.012	0.012	0.006	0.010	قطع جریان روغن			1			
43.47	4	8	1.358	0.005	0.004	0.004	0.004	0.010	تعویض فیلتر هوا		1				
23.93	3	6	1.329	0.005	0.004	0.004	0.003	0.010	کیپ شدن ایر ترپ	1					

- ستون ۱: تعداد کمپرسور سالم در سرویس یعنی از ۵ کمپرسور (با احتساب در سرویس بودن کمپرسور آماده بکار، ۴ کمپرسور در سرویس می‌باشد)
- ستون‌های ۲ تا ۶: انواع خرابی، با توجه به تعداد کمپرسورهای خراب.
- ستون ۷: مدهای خرابی رخ داده شده.
- ستون‌های ۸ تا ۱۱: هزینه‌های تعمیر، توقف تولید، ریسک و محیط زیست ایجاد شده توسط هر مد خرابی.
- ستون ۱۲: جمع کل پیامدهای هر مد خرابی به ازای تعداد کمپرسور خراب شده.
- ستون ۱۳: نرمالایزه شده ستون ۱۲.
- ستون ۱۴: فراوانی رخداد مدخرابی در سال برای این تجهیز.
- ستون ۱۵: میزان دشواری شناسایی خرابی در مقیاس اعداد بین ۱ تا ۱۰. این عدد هر چقدر به ۱۰ نزدیکتر باشد میزان شناسایی خرابی دشوارتر است.

جداول مشابه برای حالاتی که تنها ۳ و یا ۲ کمپرسور سالم و در حال سرویس باشند نیز ترسیم شده است که برای حفظ اختصار در اینجا آورده نشده است

مرحله ۶: تعیین راهکارهای پیشنهادی

پس از بررسی منابع و مستندات فنی و کسب نظرات کارشناسان و خبرگان راهکارهای پیشگیری از خرابی مشخص می‌گردد.

مرحله ۷: رتبه‌بندی راهکارهای پیشنهادی

حل مسئله با روش آیداس

پس از محاسبه وزن داده‌ها، با روش آیداس به رتبه‌بندی راهکارها می‌پردازم. در این مرحله نخست مشخصات هر یک از گزینه‌ها با توجه به معیارهای تصمیم‌گیری ذکر می‌شوند. این اطلاعات در جدول زیر آورده شده، داده‌های این جدول از جداول مرحله دوم استخراج شده است.

جدول ۹: نحوه رتبه‌بندی راهکارها (تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری)

دلیل	راهکار	هزینه راهکار	بهبود RPN	اطمینان
ایجاد مشکل	جت زنی	4.00	1993.95	0.083
	تعویض بیرینگ و انجام pm	36.00	1873.03	0.75
	بررسی و عملکرد تجهیز	12.00	1907.81	0.917
	رفع اشکالات قطع جریان	24.00	1847.52	0.5
	تعویض سر وقت فیلترها	12.00	1890.42	0.75
وایبرشن	بالانس کردن	8.00	1221.67	0.92
	تنظیم تجهیزات حساس	6.00	1368.72	0.50
	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	36.00	1306.07	0.75

0.92	1799.09	16.00	بازکردن پایپهای	قطع روغن و پمپ
0.75	1892.03	24.00	باز کردن پمپ	
0.50	1841.29	24.00	بررسی محل نشی روغن	
0.92	1513.83	16.00	فیلترهای با کیفیت	فیلتر هوا
0.75	1416.15	18.00	فاصله تعویض فیلتر	
0.25	1371.84	48.00	برطرف کردن آلودگی	
0.917	1295.08	15.00	تعویض کامل power	تنظیم سنسور
0.750	1273.93	24.00	تنظیم سنسور	
0.500	1328.92	10.00	تعویض برد	
0.67	1596.55	19.59	میانگین	
0.306	0.058	0.636	وزن	

در پایان، نحوه رتبه‌بندی راهکارهای مربوط به کل مدهای خرابی که براساس روش ایداس محاسبه شده، در جدول زیر ارائه شده؛ همینطور در مرحله بعد محاسبات ادامه می‌یابد، و نتایج آن در جدول زیر آمده است:

جدول ۱۰: محاسبه شاخص PDA برای راهکارها

اطمینان	RPN بهبود	هزینه راهکار	راهکارها	
0.0000	0.2489	0.0000	جت زنی	اقدامات درمانی
0.1166	0.1732	0.8378	تعویض بیرینگ و انجام pm	
0.3653	0.1950	0.0000	بررسی و عملکرد تجهیز	
0.0000	0.1572	0.2252	رفع اشکالات قطع جریان	
0.1166	0.1841	0.0000	تعویض سر وقت فیلترها	
0.3653	0.0000	0.0000	بالانس کردن	وایبیشن
0.0000	0.0000	0.0000	تنظیمات تجهیزات حساس	
0.1166	0.0000	0.8378	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
0.3653	0.1269	0.0000	بازکردن پایپهای	قطع روغن و پمپ
0.1166	0.1851	0.2252	باز کردن پمپ	
0.0000	0.1533	0.2252	بررسی محل نشی روغن	
0.3653	0.0000	0.0000	فیلترهای با کیفیت	فیلتر هوا
0.1166	0.0000	0.0000	فاصله تعویض فیلتر	
0.0000	0.0000	1.4505	برطرف کردن آلودگی	
0.3653	0.0000	0.0000	تعویض کامل power	تنظیم سنسور
0.1166	0.0000	0.2252	تنظیم سنسور	
0.0000	0.0000	0.0000	تعویض برد	

جدول ۱۱: محاسبه شاخص NDA برای راهکارها

اطمینان	RPN بهبود	هزینه راهکار	گزینه‌ها	
0.8760	0.0000	0.7958	جت زنی	اقدامات درمانی
0.0000	0.0000	0.0000	تعویض بیرینگ و انجام pm	
0.0000	0.0000	0.3874	بررسی و عملکرد تجهیز	
0.2556	0.0000	0.0000	رفع اشکالات قطع جریان	

0.0000	0.0000	0.3874	تعویض سر وقت فیلترها	
0.0000	0.2348	0.5916	علت نابالانس	ایزاسیون
0.2556	0.1427	0.6937	تنظیمات تجهیزات حساس	
0.0000	0.1819	0.0000	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
0.0000	0.0000	0.1832	بازکردن پایپ‌های	روغن
0.0000	0.0000	0.0000	باز کردن پمپ	
0.2556	0.0000	0.0000	بررسی محل نشستی روغن	
0.0000	0.0518	0.1832	فیلترهای با کیفیت	فیلترها
0.0000	0.1130	0.0811	فاصله تعویض فیلتر	
0.6278	0.1407	0.0000	برطرف کردن آلودگی	
0.0000	0.1888	0.2342	تعویض کامل power	تعمیرات
0.0000	0.2021	0.0000	بررسی علت درست کار نکردن سنسور	
0.2556	0.1676	0.4895	تعویض بورد	

جدول ۱۲: محاسبه شاخص SP برای راهکارها

اطمینان	RPN بهبود	هزینه راهکار	گزینه‌ها	
0.0000	0.2489	0.0000	جت زنی	ایزاسیون
0.1166	0.1732	0.8378	تعویض بیرینگ و انجام pm	
0.3653	0.1950	0.0000	بررسی و عملکرد تجهیز	
0.0000	0.1572	0.2252	رفع اشکالات قطع جریان	
0.1166	0.1841	0.0000	تعویض سر وقت فیلترها	
0.3653	0.0000	0.0000	بالانس کردن	وایبریشن
0.0000	0.0000	0.0000	تنظیمات تجهیزات حساس	
0.1166	0.0000	0.8378	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
0.3653	0.1269	0.0000	بازکردن پایپ‌ها	روغن
0.1166	0.1851	0.2252	باز کردن پمپ	
0.0000	0.1533	0.2252	بررسی محل نشستی روغن	
0.3653	0.0000	0.0000	فیلترهای با کیفیت	فیلترها
0.1166	0.0000	0.0000	فاصله تعویض فیلتر	
0.0000	0.0000	1.4505	برطرف کردن آلودگی	
0.3653	0.0000	0.0000	تعویض کامل power	تعمیرات
0.1166	0.0000	0.2252	تنظیم سنسور	
0.0000	0.0000	0.0000	تعویض بورد	

همچنین جدول ۱۳ نتایج محاسبه شاخص SN را برای راهکارها نشان می‌دهد.

جدول ۱۳: محاسبه شاخص SN برای راهکارها

جمع	اطمینان	RPN بهبود	هزینه راهکار	گزینه‌ها (SN i)	
0.7744	0.2683	0.0000	0.5060	جت زنی	ایزاسیون
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	تعویض بیرینگ و انجام pm	
0.2463	0.0000	0.0000	0.2463	بررسی و عملکرد تجهیز	

0.0783	0.0783	0.0000	0.0000	رفع اشکالات قطع جریان	
0.2463	0.0000	0.0000	0.2463	تعویض سر وقت فیلترها	
0.3897	0.0000	0.0136	0.3762	علت نابالانس	واپایش
0.5276	0.0783	0.0082	0.4411	تنظیمات تجهیزات حساس	
0.0105	0.0000	0.0105	0.0000	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
0.1165	0.0000	0.0000	0.1165	بازکردن پایپهای	قطع جریان روغن
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	باز کردن پمپ	
0.0783	0.0783	0.0000	0.0000	بررسی محل نشستی روغن	
0.1195	0.0000	0.0030	0.1165	فیلترهای با کیفیت	فیلترها
0.0581	0.0000	0.0065	0.0516	فاصله تعویض فیلتر	
0.2004	0.1923	0.0081	0.0000	برطرف کردن آلودگی	
0.1599	0.0000	0.0109	0.1489	تعویض کامل power	تدا
0.0117	0.0000	0.0117	0.0000	بررسی علت درست کار نکردن سنسور	
0.3992	0.0783	0.0097	0.3113	تعویض بورد	
MAX=	0.7744				

پس از انجام محاسبات به روش آیداس رتبه نهایی هر یک از راهکارها به صورت جدول زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱۴: رتبه بندی با روش آیداس

رتبه	ASI	NSNI	NSPI		
2	0.508	1.000	0.016	جت زنی	اقدامات
5	0.314	0.000	0.627	تعویض بیرینگ و انجام pm	
8	0.226	0.318	0.134	بررسی و عملکرد تجهیز	
13	0.133	0.101	0.165	رفع اشکالات قطع جریان	
9	0.184	0.318	0.050	تعویض سر وقت فیلترها	
6	0.312	0.503	0.121	علت نابالانس	واپایش
3	0.341	0.681	0.000	تنظیمات تجهیزات حساس	
4	0.315	0.014	0.616	رفع خرابی و بررسی علت خرابی آن	
11	0.140	0.150	0.129	بازکردن پایپهای	قطع جریان روغن
16	0.103	0.000	0.206	باز کردن پمپ	
14	0.133	0.101	0.165	بررسی محل نشستی روغن	
12	0.138	0.154	0.121	فیلترهای با کیفیت	فیلترها
17	0.057	0.075	0.039	فاصله تعویض فیلتر	
1	0.629	0.259	1.000	برطرف کردن آلودگی	
10	0.164	0.206	0.121	تعویض کامل power	تدا
15	0.105	0.015	0.194	بررسی علت درست کار نکردن سنسور	
7	0.258	0.516	0.000	تعویض بورد	

۴. بحث و نتیجه‌گیری

از این پژوهش استنباط می‌شود که علم دارایی‌های فیزیکی یکی از مهمترین ارکان اصلی مدیریت در کارخانه‌های بزرگ از جمله صنایع فرآیندی بزرگ مانند پتروشیمی، نفت و گاز و ذوب آهن بوده و سرمایه‌گذاری بر روی این مقوله منجر به کاهش هزینه نگهداشت و جلوگیری از خرابی مکرر تجهیزات حساس و بسیار مهم خواهد شد. از این رو، ارائه رویکردی جهت استفاده بهینه از تجهیزات و کاهش احتمال، شدت و عدم شناسایی خرابی‌ها ضرورت می‌یابد. موضوع اصلی این پژوهش، انتخاب بهترین راهکار پیشگیرانه برای جلوگیری از خرابی این تجهیزات است که به طور نمونه برای کمپرسورهای سانتریفیوژ اجرا شده و نتایج پژوهش از دو بُعد به اولویت‌بندی این راهکارها پرداخته است: نخست تاثیر به کارگیری این راهکارها، که بر مبنای شاخص‌های روش FMEA ارزیابی شده اند و دوم، هزینه و عملی بودن این راهکارها. در این پژوهش‌ها از روش‌های آنالیز برای تعیین وزن معیارها، از روش FMEA برای تحلیل ریسک انواع حالات خرابی و از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی راهکارهای پیشگیرانه پیشنهادی استفاده شده است. بدین ترتیب، شناسایی حالات خرابی بحرانی، پیشنهاد راهکارهای پیشگیرانه و اولویت‌بندی این راهکارها مهمترین دستاورد های این پژوهش می‌باشند. نشان دادن نحوه استفاده از ابزارهای علمی، در تحلیل یک مسئله واقعی یکی از دستاوردهای مهم دیگر این پژوهش است.

استفاده از روش پیشنهادی در پژوهش‌های آینده، برای تجهیزات غیرهمگون؛ هنگامی که تجهیزات مورد بررسی از انواع گوناگونی هستند، نیاز به اصلاحاتی در نحوه محاسبه پیامدهای خرابی دارد، ولی در عین حال کاربرد این رویکرد را افزایش می‌دهد. به علاوه، به همراه نظرات خبرگان، می‌توان از تکنیک‌های هوش مصنوعی و به ویژه یادگیری ماشین برای پیش‌بینی احتمال رخداد هر یک از حالات خرابی تجهیزات، برپایه استفاده از اطلاعات گذشته استفاده نمود. نتایج این تکنیک‌ها در دو حوزه احتمال رخداد خرابی و پیامدهای آن‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان از روش‌های شبیه‌سازی عددی، همچون شبیه‌سازی مونت کارلو، برای محاسبه و اعتبارسنجی احتمال توأم خرابی چند تجهیز استفاده نمود.

۵. سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کردستان به خاطر همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- افشارنیا، مرزبان (۱۳۹۸). کاربرد رویکرد تلفیقی ANP-FMEA در اولویت‌بندی ریسک تأخیرات انتقال محصول نیشکر به کارخانه. *نشریه ماشین‌های کشاورزی*، جلد ۹، شماره ۲، ۴۵۵-۴۶۷.
- بهروز، افشار کاظمی، آذر، اصغری زاده (۱۴۰۲). ارائه مدل پیش‌بینی ریسک های بحرانی شبکه انتقال گاز با استفاده از الگوریتم های داده کاوی. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، سال سیزدهم، شماره ۴۹، ۲۸۱-۳۲۲.
- شاکری کناری، ولی پور خطیر، صفایی قادیکائی (۱۳۹۸). تعیین استراتژیهای نگهداری و تعمیرات با استفاده از سیستم استنتاج فازی چند مرحله‌ای (مورد مطالعه: نیروگاه برق شهید سلیمی نکا). *فصلنامه علمی مطالعات مدیریت صنعتی*، سال هفدهم، شماره ۵۴، ۵۲-۲۸۲.
- شریفی، رضویان (۱۳۹۹). شناسایی خطرات و شبیه سازی پیامد حوادث احتمالی ناحیه مخازن و فلر پالایشگاه گاز ایلام به روش ETBA و نرم افزار PHAST. *نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، سال بیست و دوم، شماره ۸، پیاپی ۹۹، ۳۰۹-۳۲۲.
- نخعی‌نژاد، صفاری (۱۳۹۸). شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌های تکنولوژی در حوزه توزیع انرژی گاز طبیعی با رویکرد تلفیقی FMEA و TOPSIS مطالعه موردی: شرکت گاز استان چهارمحال و بختیاری. *مدیریت تولید و عملیات*، دوره ۱۰، پیاپی ۱۹، شماره ۲، ۱۴۳-۱۵۹.

References

- Afsharnia, F., & Marzban, A. (2019). Risk analysis of sugarcane stem transportation operation delays using the FMEA-ANP hybrid approach. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(2), 455-467. [Persian]
- Behrouz, M. S., AfsharKazemi, M. A., Azar, A., & Asgharizadeh, E. (2023). Prediction Model of the

- Gas Pipeline Critical Risk Using Data Mining Algorithms. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(1), 281-322. [Persian]
- Bhavani, K. D., Sireesha, R., Raju, K., Kumar, M. G., Naik, R., & Nagedram, S. (2021, February). Performance Analysis of 5: 2 compressor with 58 transistors. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1804, No. 1, p. 012162). IOP Publishing.
- Cavazzini, G., Giacomel, F., Ardizzon, G., Casari, N., Fadiga, E., Pinelli, M., ... & Montomoli, F. (2020). CFD-based optimization of scroll compressor design and uncertainty quantification of the performance under geometrical variations. *Energy*, 209, 118382.
- Ekradi, K., & Madadi, A. (2020). Performance improvement of a transonic centrifugal compressor impeller with splitter blade by three-dimensional optimization. *Energy*, 201, 117582.
- Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., & Turskis, Z. (2015). Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica*, 26(3), 435-451.
- Lang, J., Chu, W., Spence, S., An, G., & Galloway, L. (2021). Performance enhancement of a centrifugal compressor stage using profiled end wall (PEW) treatments in the radial vaned diffuser. *Aerospace Science and Technology*, 110, 106488.
- Li, H., Liu, X. M., Mao, Z. W., & Zhang, J. J. (2021, September). Research on fault diagnosis and early warning of reciprocating compressor based on stacked convolutional autoencoder optimized by gradient differential evolution. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1180, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- Lu, Y. J., Tung, F. Y., & Wang, C. H. (2021). Developing an expert prognosis system of the reciprocating compressor based on associations among monitoring parameters and maintenance records. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69, 104382.
- Matthews-Ewald, C. Innovative Remediation Techniques to Compressor Foundation Systems.
- Mohammadi-Amin, M., Jahangiri, A. R., & Bustanchy, M. (2020). Thermodynamic modeling, CFD analysis and parametric study of a near-isothermal reciprocating compressor. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100624. . [Persian]
- Nakhaeinejad, M., & Safari, M. (2019). Identification and ranking of technology risks in the field of natural gas energy distribution by the integrative approach of FMEA and TOPSIS The Case of Chaharmahal and Bakhtiari Province Gas Company. *Research in Production and Operations Management*, 10(2), 143-159. [Persian]
- Nitulescu, M., Slujitoru, C., Petrescu, V., Silivestru, V., Fetea, G., & Tomescu, S. (2021, September). Reducing rotors clearance-a way to increase the performance of a screw compressor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1180, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- Nordal, H., & El-Thalji, I. (2021). Assessing the technical specifications of predictive maintenance: A case study of centrifugal compressor. *Applied Sciences*, 11(4), 1527.
- Rak, J., & Pietrowicz, S. (2020). Internal flow field and heat transfer investigation inside the working chamber of a scroll compressor. *Energy*, 202, 117700.
- Reid, R. D. (2005). FMEA—something old, something new. *Quality Progress*, 38(5), 90-93.
- Shakeri Kenari, E., & Safaei Ghadikolaei, A. (2019). Determination Maintenance Strategies using multi-stage Fuzzy Inference System (the case study of shahid salimi's power plants). *Industrial Management Studies*, 17(54), 291-325. [Persian]
- Sharifi, N., Abadi, S. N. R., & Kouhikamali, R. (2021). Development of a two-fluid model for predicting phase-changing flows inside thermal vapor compressors used in thermal desalination systems. *Applied Thermal Engineering*, 195, 116943. . [Persian]
- Sharifi, S. R., & Razavian, F. (2020). Hazard identification and consequences analysis of possible accidents in the tank Farm & Flare of the ILAM gas refinery by ETBA and PHAST soft wear. *J. Environm. Sci. Technol*, 22(8), 309-322. [Persian]
- Sun, X., Zhang, J., Wang, Y., Wang, J., & Qi, Z. (2021). Optimization of capacity control of reciprocating compressor using multi-system coupling model. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117175.
- Wu, J., & Li, J. (2021). Effect of part deformation on performance of a rotary compressor using

- propane under high temperature. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117145.
- Ye, J., Yu, X., Fan, S., Lv, Q., & Wang, X. (2021, September). Research and Solution of Vibration Problem of an Air-cooled heat exchanger of Reciprocating Compressor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1180, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Zagorowska, M., Skourup, C., & Thornhill, N. F. (2020). Influence of compressor degradation on optimal operation of a compressor station. *Computers & Chemical Engineering*, 143, 107104..
- Zhenghao, G., Congrui, L., Linlin, W., & Demin, C. (2021, March). Fatigue Life Analysis of the Pump Head of Silent Reciprocating Piston Air Compressor. In *2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)* (pp. 273-278). IEEE..

