



Paper Type: Original Article

# A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Framework for Risk-Based Maintenance Strategy Selection in Railway Critical Assets: Integrating FMEA, ANP, and ELECTRE III

**Purpose:** The purpose of this paper is to propose a novel integrated decision framework for risk-based maintenance strategy selection under uncertain and complex conditions. This paper aimed to address two critical research gaps: (i) inherent uncertainty in subjective expert judgments, and (ii) neglected interdependencies among risk evaluation criteria.

**Methodology:** The framework uniquely integrates three fuzzy-based methods: Fuzzy FMEA to identify and prioritize critical failure modes using linguistic variables; Fuzzy ANP to capture nonlinear interdependencies among risk factors and generate reliable criteria weights; and ELECTRE III to perform outranking-based ranking of alternative maintenance strategies under partial information conditions.

**Findings:** The framework is validated through a real-world case study of a Ballast Cleaning Machine in the Iranian railway network, using five years of CMMS historical data. Results demonstrate that Reliability-Centered Maintenance (RCM) significantly outperforms other strategies in mitigating high-risk failures and improving asset availability.

 Corresponding Author:



Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

**Originality/Value:** The originality of this study lies in the design and application of an integrated framework that employs Fuzzy FMEA, Fuzzy ANP, and ELECTRE III as complementary methods in successive stages of the maintenance decision-making process. Within this framework, Fuzzy FMEA is used to transform uncertain and linguistic expert assessments into risk information; Fuzzy ANP is employed to account for interdependencies and feedback among risk factors in determining their relative importance; and ELECTRE III is applied to select and rank maintenance strategies under conflicting criteria and decision thresholds. Furthermore, unlike approaches that are limited to the assessment and ranking of failure modes, the proposed framework directly links the resulting risk information to the selection of an appropriate maintenance strategy. The use of five years of real CMMS data, together with sensitivity analysis to assess the stability of the results, further strengthens the practical value and reliability of the proposed framework. This integrated structure provides a transparent and adaptable decision-support tool for risk management and maintenance strategy selection in critical railway assets and other complex, asset-intensive systems.

**Keywords:** Risk-based maintenance, Fuzzy FMEA, FANP, ELECTRE III, Railway, Critical equipment



## چارچوب ترکیبی فازی چند معیاره برای انتخاب راهبرد نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک در

### دارایی های حیاتی ریلی: ادغام ANP, FMEA, ELECTRE III

چکیده

**هدف:** هدف از این مقاله، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری ترکیبی نوین برای انتخاب راهبرد نگهداری و تعمیرات ریسک‌محور در شرایط نامشخص و پیچیده است. این مقاله در پی پر کردن دو شکاف اساسی تحقیقاتی: (۱) عدم قطعیت ذاتی در قضاوت‌های خبرگی ذهنی، و (۲) نادیده گرفتن وابستگی‌های متقابل میان معیارهای ارزیابی ریسک است.

**روش‌شناسی پژوهش:** چارچوب پیشنهادی به گونه‌ای منحصربه‌فرد، سه روش مبتنی بر منطق فازی را تلفیق می‌کند: FMEA فازی برای شناسایی و اولویت‌بندی حالات بحرانی خرابی با استفاده از متغیرهای زبانی؛ ANP فازی برای مدل‌سازی روابط غیرخطی متقابل میان عوامل ریسک و تولید وزن‌های معیار قابل اطمینان؛ و ELECTRE III برای رتبه‌بندی مبتنی بر برتری گزینه‌های راهبردی تعمیرات تحت شرایط اطلاعات ناقص.

**یافته‌ها:** اعتبارسنجی چارچوب از طریق مطالعه موردی واقعی بر روی یک ماشین‌سرنده بالاست در شبکه‌ی ریلی ایران، با استفاده از داده‌های پنج‌ساله‌ی سامانه‌ی مدیریت تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) انجام شده است. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که راهبرد تعمیرات نت‌محور بر قابلیت اطمینان (RCM) در کاهش خرابی‌های پرریسک و بهبود دسترسی‌بودن دارایی، عملکرد بهتری نسبت به سایر راهبردها دارد.

**اصالت/ارزش:** اصالت این پژوهش در طراحی و به‌کارگیری یک چارچوب یکپارچه است که FMEA فازی، ANP فازی و ELECTRE III را به‌صورت مکمل و در مراحل متوالی فرآیند تصمیم‌گیری نگهداری به کار می‌گیرد. در این چارچوب، FMEA فازی برای تبدیل ارزیابی‌های زبانی و نامطمئن خبرگان به اطلاعات ریسک، ANP فازی برای لحاظ کردن وابستگی‌ها و بازخوردهای متقابل میان عوامل ریسک در تعیین اهمیت نسبی آن‌ها، و ELECTRE III برای انتخاب و رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری تحت معیارهای متعارض و آستانه‌های تصمیم‌گیری به کار گرفته می‌شود. همچنین، برخلاف رویکردهایی که صرفاً به ارزیابی و رتبه‌بندی حالات خرابی محدود می‌شوند، چارچوب پیشنهادی این اطلاعات را به‌صورت مستقیم به انتخاب راهبرد نگهداری مرتبط می‌کند. اتکای مدل به داده‌های واقعی پنج‌ساله CMMS و استفاده از تحلیل حساسیت برای بررسی پایداری نتایج، ارزش کاربردی و قابلیت اتکای چارچوب را تقویت می‌کند. این ساختار یکپارچه، یک ابزار تصمیم‌ساز شفاف و قابل انطباق برای مدیریت ریسک و انتخاب راهبرد نگهداری در دارایی‌های حیاتی ریلی و سایر سیستم‌های پیچیده و دارایی‌محور فراهم می‌سازد.

## ۱- مقدمه

توسعه حمل‌ونقل ریلی به عنوان یکی از ارکان اصلی رشد اقتصادی و حمل‌ونقل پایدار، مستلزم بهره‌برداری مستمر، ایمن و قابل اطمینان از زیرساخت‌ها و تجهیزات نگهداری خطوط است. در سال‌های اخیر، افزایش عمر دارایی‌های ریلی، محدودیت منابع مالی، افزایش تراکم ترافیک، رشد هزینه‌های تعمیرات و ضرورت کاهش توقف‌های عملیاتی، مدیریت نگهداری و تعمیرات را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های راهبردی صنعت راه‌آهن تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، خرابی تجهیزات حیاتی روسازی و ماشین‌آلات نگهداری خطوط، علاوه بر تحمیل هزینه‌های مستقیم تعمیرات، موجب کاهش قابلیت اطمینان شبکه، افت کیفیت عملیات نگهداری، کاهش دسترسی‌پذیری خطوط و افزایش ریسک‌های ایمنی می‌شود. بنابراین انتخاب راهبرد مناسب نگهداری و تعمیرات، نه تنها یک تصمیم فنی، بلکه یکی از مهم‌ترین تصمیمات راهبردی در مدیریت دارایی‌های فیزیکی صنعت ریلی محسوب می‌شود. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در صنایع سرمایه‌بر سهم قابل توجهی از هزینه‌های چرخه عمر تجهیزات را تشکیل می‌دهد و اتخاذ راهبردهای نامناسب می‌تواند موجب افزایش توقف‌های برنامه‌ریزی نشده، کاهش قابلیت اطمینان تجهیزات، افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش بهره‌وری سازمان شود [۶-۱]. در مقابل، انتخاب راهبرد مناسب نگهداری و تعمیرات علاوه بر کاهش هزینه‌ها، قابلیت اطمینان، دسترسی‌پذیری و ایمنی سیستم را نیز بهبود می‌بخشد. از این رو، مسئله اصلی در مدیریت نگهداری و تعمیرات صرفاً انجام فعالیت‌های تعمیراتی نیست، بلکه انتخاب راهبردی است که بتواند میان اهداف اقتصادی، عملیاتی و ایمنی تعادل برقرار کند.

انتخاب راهبرد نگهداری و تعمیرات برای دارایی‌های حیاتی ریلی، یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره و مبتنی بر ریسک است؛ زیرا تصمیم‌گیرندگان باید به طور همزمان معیارهایی نظیر قابلیت اطمینان، هزینه چرخه عمر، دسترسی‌پذیری، قابلیت تعمیر، ایمنی، پیامدهای خرابی و محدودیت منابع را در نظر بگیرند. علاوه بر این، این معیارها مستقل از یکدیگر نبوده و میان آن‌ها روابط متقابل و گاه متعارض وجود دارد. بنابراین استفاده از مدل‌هایی که بتوانند هم‌زمان وابستگی معیارها و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان را مدل‌سازی کنند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات است [۷، ۸].

بررسی انتقادی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم توسعه گسترده مدل‌های تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات، سه خلأ اساسی همچنان وجود دارد. نخست، در بسیاری از پژوهش‌ها عدم قطعیت ناشی از قضاوت خبرگان به صورت کامل مدل‌سازی نشده است. دوم، وابستگی متقابل میان معیارهای تصمیم‌گیری در اغلب مدل‌ها نادیده گرفته شده و فرض استقلال معیارها در نظر گرفته شده است. سوم، فرآیند شناسایی ریسک، تعیین اهمیت معیارها و انتخاب راهبرد نگهداری غالباً به صورت مستقل انجام شده و ارتباط منطقی میان این سه مرحله برقرار نشده است. این محدودیت‌ها می‌تواند به انتخاب راهبردهایی منجر شود که با شرایط واقعی بهره‌برداری تجهیزات ریلی انطباق کافی ندارند. بر همین اساس، پژوهش

حاضر ترکیب<sup>۱</sup> Fuzzy FMEA، FANP<sup>۲</sup> و ELECTRE<sup>۳</sup> III را نه صرفاً به دلیل متداول بودن این روش‌ها، بلکه بر اساس نقش مکمل هر یک در فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب کرده است. در چارچوب پیشنهادی، Fuzzy FMEA وظیفه شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های خرابی در شرایط عدم قطعیت را بر عهده دارد؛ FANP با در نظر گرفتن وابستگی‌ها و بازخورد میان معیارها، وزن‌های واقع‌بینانه‌تری تولید می‌کند و ELECTRE III با بهره‌گیری از مفهوم روابط برتری و آستانه‌های ترجیح، بی‌تفاوتی و وتو، امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها را بدون اعمال جبران کامل میان معیارها فراهم می‌آورد. این ویژگی‌ها موجب می‌شود چارچوب پیشنهادی نسبت به ترکیب‌های رایجی نظیر<sup>۴</sup> FMEA+AHP و<sup>۵</sup> TOPSIS توانایی بیشتری در مدل‌سازی شرایط واقعی تصمیم‌گیری در صنعت ریلی داشته باشد.

## ۲- مروری بر ادبیات پژوهش

انتخاب راهبرد مناسب نگهداری و تعمیرات یکی از مهم‌ترین تصمیمات مدیریت دارایی‌های فیزیکی است که تأثیر مستقیمی بر قابلیت اطمینان تجهیزات، دسترس‌پذیری، ایمنی، هزینه چرخه عمر و پایداری بهره‌برداری دارد. با افزایش پیچیدگی سیستم‌های صنعتی و رشد انتظارات از عملکرد تجهیزات، رویکردهای نگهداری و تعمیرات نیز از سیاست‌های سنتی و واکنشی به سمت راهبردهای هوشمند، مبتنی بر ریسک و داده‌محور تکامل یافته‌اند. در این میان، پژوهشگران تلاش کرده‌اند با توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، انتخاب راهبرد مناسب را متناسب با ویژگی‌های هر صنعت، شرایط عملیاتی و اهداف سازمانی بهبود بخشند. با این حال، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که هنوز اجماع کاملی درباره مناسب‌ترین چارچوب تصمیم‌گیری برای انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات وجود ندارد؛ زیرا هر یک از روش‌های ارائه‌شده تنها بخشی از پیچیدگی این مسئله را پوشش می‌دهند.

### ۲-۱- تکامل راهبردهای نگهداری و تعمیرات

راهبردهای نگهداری و تعمیرات طی شش دهه گذشته همگام با تحول فناوری، توسعه سیستم‌های تولیدی و افزایش پیچیدگی تجهیزات، دستخوش تغییرات اساسی شده‌اند. نخستین نسل این راهبردها مبتنی بر نگهداری واکنشی (RtF<sup>۶</sup>) بود که در آن تجهیزات تا زمان وقوع خرابی مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفتند و پس از خرابی تعمیر یا تعویض می‌شدند. اگرچه این رویکرد

<sup>۱</sup> Failure modes and effects Analysis

<sup>۲</sup> Fuzzy Analytic Network Process

<sup>۳</sup> Elimination et Choice Translating Reality

<sup>۴</sup> Analytic Hierarchy process

<sup>۵</sup> The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

<sup>۶</sup> Run-to-Failure

از نظر هزینه‌های برنامه‌ریزی ساده بود، اما موجب افزایش توقف‌های ناخواسته، کاهش قابلیت اطمینان و تحمیل هزینه‌های سنگین ناشی از خرابی‌های ناگهانی می‌شد [۹-۱۵].

در ادامه، با افزایش اهمیت قابلیت اطمینان تجهیزات، نگهداری پیشگیرانه<sup>۱</sup> (PM) توسعه یافت. در این رویکرد، فعالیت‌های نگهداری بر اساس زمان یا میزان کارکرد تجهیزات برنامه‌ریزی می‌شوند تا احتمال وقوع خرابی کاهش یابد. هرچند این سیاست توانست تعداد خرابی‌های ناگهانی را کاهش دهد، اما انجام تعمیرات غیرضروری و جایگزینی زود هنگام قطعات از مهم‌ترین محدودیت‌های آن محسوب می‌شود [۱۰، ۱۶-۱۹].

پیشرفت فناوری حسگرها، سامانه‌های پایش وضعیت و تحلیل داده‌ها، زمینه را برای توسعه نگهداری پیش‌بینانه<sup>۲</sup> (PdM) فراهم کرد. در این راهبرد، تصمیمات نگهداری بر اساس وضعیت واقعی تجهیزات، تحلیل روند تغییر پارامترهای عملکردی و پیش‌بینی زمان خرابی اتخاذ می‌شود. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌های نگهداری، امکان افزایش دسترسی‌پذیری تجهیزات و کاهش توقف‌های غیرضروری را فراهم می‌سازد [۲۰-۲۵].

در سال‌های اخیر، رویکردهایی نظیر نگهداری فرصت‌طلبانه و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان نیز به‌طور گسترده توسعه یافته‌اند. در میان این رویکردها، RCM<sup>۳</sup> به دلیل تمرکز بر تحلیل حالت‌های خرابی، پیامدهای آنها و انتخاب فعالیت‌های نگهداری متناسب با سطح بحرانی بودن تجهیزات، جایگاه ویژه‌ای در صنایع حساس از جمله صنایع ریلی، هوایی، نفت و گاز و نیروگاهی پیدا کرده است [۲۶-۲۸]. با وجود این، انتخاب مناسب‌ترین راهبرد نگهداری همچنان یک مسئله پیچیده و وابسته به شرایط عملیاتی، ویژگی‌های تجهیزات و اهداف سازمان است؛ به همین دلیل، استفاده از چارچوب‌های تصمیم‌گیری علمی برای انتخاب راهبرد مناسب ضروری است.

## ۲-۲- چارچوب‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات

انتخاب راهبرد مناسب نگهداری و تعمیرات ذاتاً یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۴</sup> (MCDM) است؛ زیرا تصمیم‌گیرندگان باید به‌طور هم‌زمان مجموعه‌ای از معیارهای فنی، اقتصادی، ایمنی، عملیاتی و مدیریتی را در نظر بگیرند. برخلاف بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری کلاسیک، معیارهای مؤثر بر انتخاب راهبرد نگهداری نه تنها متعدد، بلکه دارای روابط متقابل، تعارض و وابستگی درونی هستند. علاوه بر این، اطلاعات مورد استفاده در این تصمیم‌ها اغلب بر پایه قضاوت خبرگان، تجربیات عملیاتی و داده‌های ناقص شکل می‌گیرد که ماهیتی همراه با عدم قطعیت و ابهام دارند. از این‌رو، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره طی دو دهه گذشته به یکی از مهم‌ترین ابزارهای پشتیبان تصمیم در مدیریت نگهداری و تعمیرات تبدیل شده‌اند [۲۹].

<sup>1</sup> Preventive Maintenance

<sup>2</sup> Predictive Maintenance

<sup>3</sup> Reliability-Centered Maintenance

<sup>4</sup> Multi Criteria Decision Making

در میان روش‌های MCDM، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از پرکاربردترین روش‌ها در انتخاب سیاست‌های نگهداری و تعمیرات است. این روش به دلیل ساختار ساده، قابلیت مقایسه زوجی معیارها و سهولت محاسبات، در صنایع مختلفی از جمله پالایشگاه‌های نفت، خطوط لوله، صنایع سیمان، نیروگاه‌ها، صنایع فلزی و سیستم‌های تولیدی به‌کار گرفته شده است [۳۰-۴۲]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که AHP ابزار مناسبی برای ساختاردهی مسائل پیچیده تصمیم‌گیری است، اما مهم‌ترین محدودیت آن فرض استقلال معیارهاست؛ در حالی که در مسائل واقعی نگهداری و تعمیرات، معیارهایی نظیر قابلیت اطمینان، هزینه، ایمنی، قابلیت تعمیر و دسترس‌پذیری به‌شدت بر یکدیگر اثر متقابل دارند. بنابراین، استفاده از AHP در بسیاری از کاربردهای پیچیده ممکن است به وزن‌دهی غیرواقع‌بینانه معیارها منجر شود.

به‌منظور رفع بخشی از این محدودیت‌ها، پژوهشگران استفاده از روش‌های رتبه‌بندی نظیر TOPSIS<sup>۱</sup>، VIKOR<sup>۱</sup>، COPRAS<sup>۲</sup> و SAW<sup>۳</sup> را توسعه داده‌اند [۴۳-۶۲]. این روش‌ها با مقایسه هم‌زمان گزینه‌ها بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل یا شاخص‌های مشابه، امکان رتبه‌بندی گزینه‌های نگهداری را فراهم می‌کنند و در بسیاری از مطالعات با منطق فازی نیز ترکیب شده‌اند تا عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان کاهش یابد [۴۵-۶۲]. اگرچه این روش‌ها نسبت به مدل‌های کلاسیک انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، اما اغلب بر اصل جبران‌پذیری کامل معیارها استوار هستند؛ بدین معنا که عملکرد ضعیف یک گزینه در یک معیار می‌تواند با عملکرد مناسب آن در سایر معیارها جبران شود. این فرض در مسائل نگهداری و تعمیرات تجهیزات حیاتی، به‌ویژه در صنایع ریلی، همواره معتبر نیست؛ زیرا ضعف در معیارهایی نظیر ایمنی یا قابلیت اطمینان، حتی با عملکرد مطلوب در سایر معیارها نیز قابل چشم‌پوشی نیست.

به همین دلیل، فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به‌عنوان توسعه‌یافته AHP معرفی شد تا بتواند وابستگی‌ها و بازخوردهای میان معیارهای تصمیم‌گیری را مدل‌سازی کند. پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه نگهداری و تعمیرات نشان داده‌اند که ANP نسبت به AHP وزن‌های واقع‌بینانه‌تری برای معیارها تولید می‌کند و در صنایع مختلف از جمله ناوگان ریلی، صنایع شیمیایی، نیروگاهی و تولیدی کاربرد موفقی داشته است [۶۳-۷۳]. با وجود این، ANP صرفاً ابزاری برای تعیین اهمیت نسبی معیارهاست و به‌تنهایی قادر به رتبه‌بندی رفتاری گزینه‌ها یا مدل‌سازی روابط برتری میان آن‌ها نیست. ازاین‌رو، در بسیاری از مطالعات، ANP با سایر روش‌های تصمیم‌گیری ترکیب شده تا فرآیند انتخاب گزینه تکمیل شود.

هم‌زمان، توسعه نظریه مجموعه‌های فازی امکان مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از قضاوت‌های انسانی را فراهم کرده است. در مسائل نگهداری و تعمیرات، بسیاری از اطلاعات بر پایه ارزیابی‌های کیفی خبرگان شکل می‌گیرد و بیان آن‌ها به‌صورت قطعی، همواره واقعیت تصمیم‌گیری را منعکس نمی‌کند. به همین دلیل، استفاده از منطق فازی در کنار روش‌هایی نظیر AHP، ANP،

<sup>1</sup> VlseKriterijumska Optimicija I Kompromisno Resenje

<sup>2</sup> Complex Proportional Assessment

<sup>3</sup> Simple Additive Weighting

TOPSIS<sup>1</sup>، DEMATEL<sup>1</sup> و سایر تکنیک‌های MCDM به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [۴۵، ۵۹، ۶۶، ۶۷، ۷۴]. این مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب منطق فازی با روش‌های تصمیم‌گیری، دقت مدل‌ها را در مواجهه با اطلاعات مبهم افزایش می‌دهد؛ با این حال، در اغلب آن‌ها فرآیند تحلیل ریسک، وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی راهبردها به‌صورت مجزا انجام شده و ارتباط نظام‌مند میان این سه مرحله برقرار نشده است.

در میان روش‌های برتری‌محور، خانواده ELECTRE به‌ویژه ELECTRE III جایگاه ویژه‌ای در مسائل تصمیم‌گیری پیچیده پیدا کرده است. برخلاف روش‌های مبتنی بر فاصله از راه‌حل ایده‌آل، ELECTRE III بر مفهوم روابط برتری (Outranking) استوار است و با استفاده از آستانه‌های بی‌تفاوتی، ترجیح و وتو، تصمیم‌گیری را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند [۷۵-۸۰]. این ویژگی موجب می‌شود گزینه‌هایی که در معیارهای بحرانی عملکرد ضعیفی دارند، صرفاً به دلیل عملکرد مناسب در سایر معیارها به‌عنوان گزینه برتر انتخاب نشوند. به همین دلیل، ELECTRE III در مسائلی که ایمنی، قابلیت اطمینان و ریسک نقش تعیین‌کننده دارند، نسبت به بسیاری از روش‌های جبرانی عملکرد مناسب‌تری دارد [۶۸، ۶۱-۸۳]. با این وجود، کیفیت نتایج ELECTRE III به میزان زیادی به صحت وزن معیارها و کیفیت تحلیل اولیه ریسک وابسته است؛ بنابراین، استفاده مستقل از این روش نمی‌تواند تمام پیچیدگی‌های تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات را پوشش دهد.

بررسی روند مطالعات نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر، حرکت پژوهش‌ها از استفاده از یک روش منفرد به سمت توسعه چارچوب‌های ترکیبی<sup>۲</sup> (HDMF) بوده است. هدف اصلی این چارچوب‌ها بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای روش‌های مختلف و کاهش محدودیت‌های ذاتی هر یک از آن‌ها است. با وجود این، اکثر چارچوب‌های موجود تنها دو مرحله از فرآیند تصمیم‌گیری، مانند وزن‌دهی و رتبه‌بندی یا تحلیل ریسک و رتبه‌بندی، را به یکدیگر متصل کرده‌اند و کمتر پژوهشی موفق شده تا فرآیند شناسایی ریسک، مدل‌سازی وابستگی معیارها و رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری را در قالب یک چارچوب منسجم و یکپارچه تلفیق کند. این موضوع، یکی از مهم‌ترین خلأهای موجود در ادبیات انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات محسوب می‌شود و ضرورت توسعه مدل‌های جامع‌تر را نشان می‌دهد.

### ۳-۲- تحلیل انتقادی مطالعات پیشین

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات، طی دو دهه اخیر از نظر روش‌شناسی پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل ریسک و منطق فازی به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، بررسی انتقادی این مطالعات نشان می‌دهد که هنوز محدودیت‌های اساسی در مدل‌های موجود وجود دارد که مانع از تصمیم‌گیری جامع در محیط‌های صنعتی پیچیده می‌شود.

<sup>1</sup> Decision Making Trial and evaluation laboratory

<sup>2</sup> Hybrid Decision-Making Frameworks

نخست، بخش قابل توجهی از مطالعات، تحلیل ریسک خرابی را مستقل از فرآیند انتخاب راهبرد نگهداری انجام داده‌اند. در این پژوهش‌ها اگرچه ریسک‌های خرابی شناسایی و اولویت‌بندی شده‌اند، اما نتایج حاصل از تحلیل ریسک به صورت مستقیم در تعیین اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری یا رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری مورد استفاده قرار نگرفته است. در نتیجه، ارتباط منطقی میان تحلیل ریسک و انتخاب راهبرد نگهداری به طور کامل برقرار نشده است.

دوم، اگرچه استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر AHP، TOPSIS، VIKOR و COPRAS موجب بهبود فرآیند انتخاب راهبردهای نگهداری شده است، اما اغلب این روش‌ها بر فرض استقلال معیارها استوار هستند. این فرض در مسائل واقعی نگهداری و تعمیرات، به‌ویژه در دارایی‌های حیاتی صنعت ریلی، معتبر نیست؛ زیرا معیارهایی نظیر قابلیت اطمینان، ایمنی، هزینه چرخه عمر، قابلیت تعمیر و دسترس‌پذیری دارای روابط متقابل و اثرگذاری دوطرفه هستند. نادیده گرفتن این وابستگی‌ها می‌تواند موجب برآورد غیرواقعی اهمیت معیارها و در نهایت انتخاب راهبردی شود که با شرایط عملیاتی واقعی انطباق کافی ندارد.

سوم، بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده در ادبیات، اگرچه از منطق فازی برای کاهش عدم قطعیت ناشی از قضاوت خبرگان استفاده کرده‌اند، اما در مرحله رتبه‌بندی نهایی همچنان از روش‌هایی بهره گرفته‌اند که قابلیت مدل‌سازی رفتار واقعی تصمیم‌گیرندگان و مفهوم برتری نسبی میان گزینه‌ها را ندارند. در چنین شرایطی، امکان جبران کامل عملکرد ضعیف یک گزینه در یک معیار بحرانی از طریق عملکرد مناسب در سایر معیارها وجود دارد؛ در حالی که در سیستم‌های حساس نظیر صنعت راه‌آهن، ضعف در معیارهایی مانند ایمنی یا قابلیت اطمینان نمی‌تواند با مزیت‌های اقتصادی جبران شود.

چهارم، بررسی مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر چارچوب‌های ترکیبی تنها دو مرحله از فرآیند تصمیم‌گیری را با یکدیگر تلفیق کرده‌اند؛ برای مثال، تحلیل ریسک با وزن‌دهی معیارها یا وزن‌دهی معیارها با رتبه‌بندی گزینه‌ها ترکیب شده است. در مقابل، پژوهش‌هایی که بتوانند فرآیند شناسایی ریسک، مدل‌سازی وابستگی معیارها و انتخاب راهبرد نگهداری را در قالب یک چارچوب منسجم و مبتنی بر داده‌های واقعی صنعتی یکپارچه کنند، همچنان محدود هستند.

علاوه بر این، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین بر صنایع تولیدی، نفت و گاز، نیروگاهی یا فرآیندی متمرکز بوده‌اند و پژوهش‌های اندکی به مسئله انتخاب راهبرد نگهداری برای دارایی‌های حیاتی صنعت ریلی با استفاده از داده‌های واقعی بهره‌برداری پرداخته‌اند. این موضوع ضرورت توسعه مدل‌هایی متناسب با ویژگی‌های فنی، عملیاتی و ایمنی شبکه ریلی را بیش از پیش آشکار می‌کند.

#### ۴-۲- شکاف‌های پژوهشی و جایگاه پژوهش حاضر

بر اساس تحلیل انجام‌شده، مهم‌ترین شکاف‌های پژوهشی موجود در ادبیات را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

**شکاف اول:** فقدان چارچوبی که تحلیل ریسک خرابی را به صورت نظام‌مند به فرآیند انتخاب راهبرد نگهداری متصل کند.

**شکاف دوم:** ناتوانی بسیاری از مدل‌های موجود در مدل‌سازی هم‌زمان عدم قطعیت ناشی از قضاوت خبرگان و وابستگی میان معیارهای تصمیم‌گیری.

**شکاف سوم:** استفاده گسترده از روش‌های جبرانی که امکان جبران عملکرد ضعیف در معیارهای بحرانی را فراهم می‌کنند و در نتیجه برای سیستم‌های حساس نظیر راه‌آهن مناسب نیستند.

**شکاف چهارم:** کمبود مطالعاتی که چارچوبی یکپارچه برای شناسایی ریسک، تعیین اهمیت معیارها و رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری ارائه دهند.

**شکاف پنجم:** محدود بودن مطالعات کاربردی مبتنی بر داده‌های واقعی سیستم‌های مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) در صنعت ریلی ایران.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اگرچه پژوهش‌های پیشین سهم قابل‌توجهی در توسعه روش‌های انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات داشته‌اند، اما هنوز چارچوبی که به‌صورت هم‌زمان سه مؤلفه اساسی تحلیل ریسک در شرایط عدم قطعیت، مدل‌سازی وابستگی میان معیارهای تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی رفتاری راهبردهای نگهداری را در قالب یک فرآیند منسجم و مبتنی بر داده‌های واقعی صنعت ریلی تلفیق کند، به‌ندرت مشاهده می‌شود. بنابراین، با توجه به این شکاف‌ها، نوآوری اصلی این پژوهش صرفاً در ترکیب سه روش شناخته‌شده نیست، بلکه در یکپارچه‌سازی نظام‌مند سه مرحله تحلیل ریسک، مدل‌سازی وابستگی معیارها و رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌های واقعی صنعت ریلی است. این چارچوب با استفاده از اطلاعات پنج‌ساله استخراج‌شده از سامانه CMMS راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، قابلیت کاربرد عملی در محیط‌های واقعی را نیز نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان ابزاری برای پشتیبانی تصمیم مدیران نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱. مقایسه مطالعات پیشین و پژوهش حاضر

Table 1. Comparison of Previous Studies and the Present Study

| پژوهش                       | حوزه کاربرد     | روش تحلیل ریسک | روش وزن‌دهی معیارها | روش رتبه‌بندی | مدل‌سازی عدم قطعیت | وابستگی معیارها | داده واقعی صنعتی | مهم‌ترین محدودیت                     |
|-----------------------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|
| Bevilacqua & Braglia [33]   | صنایع تولیدی    | FMEA           | AHP                 | AHP           | X                  | X               | ✓                | استقلال معیارها و عدم لحاظ عدم قطعیت |
| Bertolini & Bevilacqua [34] | صنایع فرآیندی   | FMEA           | AHP                 | TOPSIS        | X                  | X               | ✓                | جبران‌پذیری کامل معیارها             |
| Wang et al. [48]            | تجهیزات صنعتی   | Fuzzy FMEA     | Fuzzy AHP           | TOPSIS        | ✓                  | X               | ✓                | عدم مدل‌سازی وابستگی معیارها         |
| Arunraj & Maiti [53]        | صنایع نفت و گاز | FMEA           | ANP                 | ANP           | X                  | ✓               | ✓                | فاقد رتبه‌بندی رفتاری                |
| Carnero [130]               | صنایع شیمیایی   | FMEA           | AHP                 | PROMETHEE     | X                  | X               | ✓                | فرض استقلال معیارها                  |

<sup>1</sup> Computerized Maintenance Management System

|                                                                |                      |      |   |                |             |                       |                                 |                                 |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|------|---|----------------|-------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| تحلیل محدود ریسک                                               | ✓                    | X    | X | TOPSIS         | AHP         | RCM                   | صنایع تولیدی                    | Al-Najjar[61]                   |
| عدم لحاظ روابط بازخورد                                         | ✓                    | X    | ✓ | VIKOR          | Fuzzy AHP   | Fuzzy FMEA            | تولید                           | Kutlu & Ekmekçioğlu [131]       |
| عدم استفاده از روابط برتری                                     | ✓                    | ✓    | X | VIKOR          | ANP         | FMEA                  | تولید                           | Ilangkumaran et al. [72]        |
| جبران پذیری کامل معیارها                                       | ✓                    | ✓    | ✓ | TOPSIS         | FANP        | Fuzzy FMEA            | سیستم های پیچیده                | Dinmohammadi & Shafiee [132]    |
| عدم یکپارچه سازی تحلیل ریسک                                    | ✓                    | بخشی | ✓ | PROMETHEE      | BWM         | FMEA                  | دارایی های صنعتی                | Zammori et al. [133]            |
| فاقد تحلیل حالات خرابی                                         | ✓                    | ✓    | ✓ | VIKOR          | DANP        | Fuzzy Risk Assessment | حمل و نقل                       | Chou et al. [134]               |
| عدم استفاده از روش های Outranking                              | ✓                    | ✓    | ✓ | TOPSIS         | DEMATEL-ANP | FMEA                  | راه آهن                         | Liu et al. [18]                 |
| عدم یکپارچگی کامل سه مرحله تصمیم گیری                          | بعضاً                | ✓    | ✓ | TOPSIS / VIKOR | BWM / DANP  | FMEA / FTA            | صنایع مختلف                     | مطالعات هیبرید (2022–2024) اخیر |
| یکپارچه سازی تحلیل ریسک، وزن دهی وابسته و رتبه بندی برتری محور | ✓<br>(CMMS پنج ساله) | ✓    | ✓ | ELECTRE III    | FANP        | Fuzzy FMEA            | ماشین آلات روسازی راه آهن ایران | پژوهش حاضر                      |

### ۳- روش شناسی پژوهش

به منظور انتخاب راهبرد بهینه نگهداری و تعمیرات برای ماشین آلات حیاتی روسازی ریلی، در این پژوهش یک چارچوب تصمیم گیری یکپارچه مبتنی بر سه روش مکمل شامل تحلیل حالات و آثار خرابی فازی (Fuzzy FMEA)، فرآیند تحلیل شبکه ای فازی (FANP) و روش برتری سازی ELECTRE III توسعه داده شده است. انتخاب این سه روش بر این مبنا استوار است که هر یک بخشی از فرآیند تصمیم گیری را پوشش می دهند و ترکیب آن ها امکان تحلیل جامع مسئله را در شرایط عدم قطعیت، وجود وابستگی میان معیارها و ضرورت رتبه بندی واقع بینانه گزینه ها فراهم می سازد.

در چارچوب پیشنهادی، Fuzzy FMEA به عنوان مرحله نخست برای شناسایی حالات خرابی، ارزیابی ریسک و اولویت بندی عوامل بحرانی به کار گرفته شده است. استفاده از منطق فازی موجب می شود قضاوت های زبانی خبرگان درباره شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص خرابی به اعداد فازی تبدیل شده و ابهام و عدم قطعیت موجود در ارزیابی های انسانی

کاهش یابد. در این مرحله، هر یک از پارامترهای شدت<sup>۱</sup> (S)، وقوع<sup>۲</sup> (O) و قابلیت تشخیص<sup>۳</sup> (D) با استفاده از اعداد فازی مثلثی متناظر با مقیاس‌های زبانی ارزیابی شده و عدد اولویت ریسک فازی (FRPN) از طریق تجمیع مقادیر فازی محاسبه می‌شود. سپس به منظور امکان مقایسه و اولویت‌بندی ریسک‌ها، مقادیر FRPN با استفاده از روش مرکز ثقل غیرفازی‌سازی می‌شوند [۸۴-۱۰۳].

در مرحله دوم، از فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی (FANP) برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای تصمیم‌گیری استفاده شده است. برخلاف روش‌های سلسله‌مراتبی متداول، FANP قادر است روابط متقابل و بازخورد میان معیارها را در فرآیند وزن‌دهی لحاظ کند. این ویژگی، به‌ویژه در مسائل نگهداری و تعمیرات که معیارهایی نظیر هزینه، قابلیت اطمینان، ایمنی، دسترس‌پذیری و قابلیت نگهداری بر یکدیگر اثرگذار هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد. بهره‌گیری از نسخه فازی ANP نیز موجب کاهش اثر عدم قطعیت و ناسازگاری موجود در قضاوت‌های خبرگان شده و وزن‌هایی واقع‌بینانه‌تر برای معیارهای تصمیم‌گیری فراهم می‌کند [۸۱، ۱۰۴-۱۲۱].

در مرحله نهایی، ELECTRE III برای رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار گرفته است. این روش بر پایه مفهوم روابط برتری<sup>۴</sup> توسعه یافته و با استفاده از آستانه‌های بی‌تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وتو (v)، امکان مقایسه گزینه‌ها را در شرایطی فراهم می‌کند که تفاوت‌های جزئی یا عدم قطعیت موجود در داده‌ها نباید به تغییر غیرواقعی رتبه‌بندی منجر شود. در پژوهش حاضر، مقادیر این آستانه‌ها بر اساس تحلیل داده‌های تاریخی استخراج شده از سامانه مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) و همچنین قضاوت خبرگان تعیین شده‌اند تا رفتار واقعی تصمیم‌گیرندگان در فرآیند انتخاب راهبرد نگهداری به‌طور مناسب مدل‌سازی شود [۸۲، ۱۲۲-۱۲۶].

یکی از مزیت‌های اصلی چارچوب پیشنهادی، یکپارچه‌سازی سه مرحله شناسایی ریسک، وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی راهبردها در قالب یک فرآیند منسجم تصمیم‌گیری است. اگرچه مطالعات متعددی از ترکیب روش‌های تحلیل ریسک و تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه‌های مختلف صنعتی استفاده کرده‌اند [۸۳، ۱۰۴، ۱۱۵]، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد هم‌زمان Fuzzy FMEA، FANP و ELECTRE III در مسئله انتخاب راهبرد نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات روسازی ریلی، به‌ویژه با استفاده از داده‌های واقعی CMMS، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، نوآوری این پژوهش نه در معرفی هر یک از روش‌ها، بلکه در تلفیق نظام‌مند آن‌ها در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک برای صنعت ریلی است. به منظور افزایش قابلیت تکرارپذیری پژوهش، تمامی مراحل اجرای چارچوب شامل انتخاب خبرگان، گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، طراحی مقیاس‌های زبانی، فازی‌سازی قضاوت‌ها، تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی

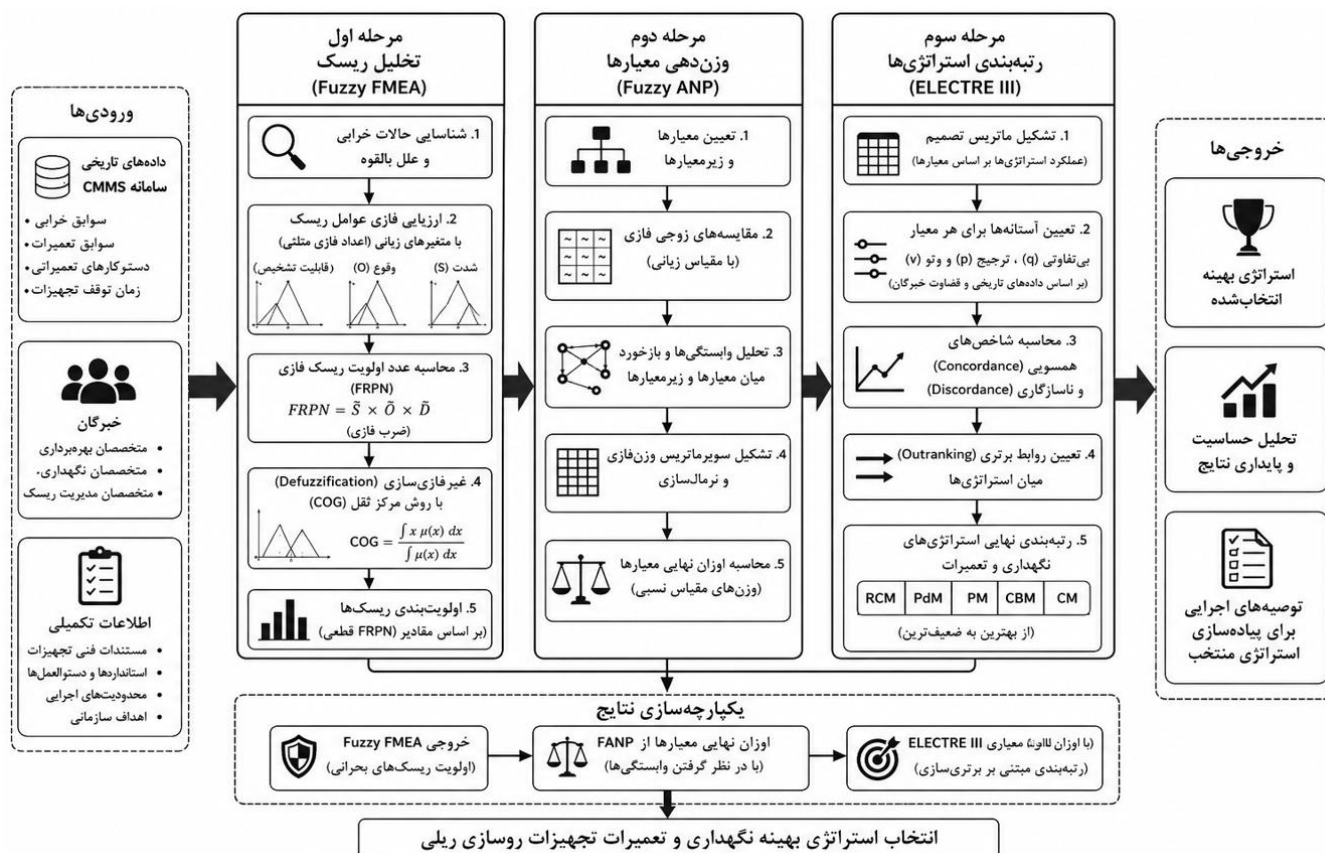
<sup>1</sup> Severity

<sup>2</sup> Occurrence

<sup>3</sup> Detection

<sup>4</sup>Outranking

در FANP، تعیین آستانه‌های تصمیم‌گیری در ELECTRE III و یکپارچه‌سازی نتایج به صورت گام به گام تشریح شده است. شکل (۱) چارچوب کلی و توالی اجرای مراحل پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- چارچوب ترکیبی پیشنهادی

Figure1- proposed hybrid framework

### ۱-۳- شناسایی ریسک‌های خرابی با استفاده از Fuzzy FMEA

تحلیل حالات و آثار خرابی (FMEA) یکی از شناخته‌شده‌ترین ابزارهای تحلیل پیشگیرانه ریسک است که با هدف شناسایی حالات بالقوه خرابی، تحلیل پیامدهای آن‌ها و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش کلاسیک، میزان بحرانی بودن هر حالت خرابی از طریق عدد اولویت ریسک<sup>۱</sup> (RPN) تعیین می‌شود که حاصل ضرب سه شاخص شدت اثر (S)، احتمال وقوع (O) و قابلیت تشخیص (D) بدست می‌آید [۸۴-۸۵].

$$RPN = O \times S \times D \quad (1)$$

<sup>1</sup> Risk Priority Number

با وجود کاربرد گسترده FMEA، مطالعات متعددی محدودیت‌های روش کلاسیک را مورد توجه قرار داده‌اند. مهم‌ترین این محدودیت‌ها شامل امکان تولید مقادیر یکسان RPN برای حالات خرابی با ماهیت‌های متفاوت، فرض برابری اهمیت سه شاخص ریسک، نبود مبنای نظری کافی برای ساختار ضربی RPN، ناتوانی در مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان و قدرت تفکیک پایین مقادیر RPN در رتبه‌بندی ریسک‌ها است. این محدودیت‌ها می‌تواند منجر به اولویت‌بندی نادرست ریسک‌ها و در نتیجه تخصیص غیربهبوده منابع نگهداری و تعمیرات شود [۸۶-۹۳].

به‌منظور رفع این محدودیت‌ها، پژوهشگران رویکردهای متعددی از جمله استفاده از منطق فازی، نظریه خاکستری، تحلیل پوششی داده‌ها، استدلال بیزی، برنامه‌ریزی خطی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را پیشنهاد کرده‌اند [۸۷-۱۰۴]. در میان این روش‌ها، Fuzzy FMEA به دلیل توانایی در مدل‌سازی ابهام و عدم قطعیت موجود در ارزیابی‌های انسانی، یکی از پرکاربردترین توسعه‌های FMEA محسوب می‌شود [۸۶، ۹۱، ۱۰۱، ۱۰۳].

بر همین اساس، در پژوهش حاضر از Fuzzy FMEA برای شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های خرابی استفاده شده است. در ادامه، به‌منظور امکان مقایسه و رتبه‌بندی ریسک‌ها، مقادیر FRPN با استفاده از روش مرکز ثقل (Center of Area) غیرفازی‌سازی می‌شوند [۹۴-۱۱۱، ۹۲].

به‌منظور جلوگیری از افزایش حجم مقاله، مقیاس‌های زبانی و اعداد فازی متناظر با شاخص‌های شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص در پیوست A (جدول A1 تا A3) ارائه شده‌اند. این مقیاس‌ها بر اساس مطالعات Wang و همکاران [۱۰۱] و Chu و Zhang [۱۰۳] انتخاب شده و در فرآیند ارزیابی تمامی حالات خرابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اجرای Fuzzy FMEA در این پژوهش در چهار گام انجام شده است:

۱. شناسایی حالات بالقوه خرابی تجهیزات و زیرریسک‌های مرتبط؛
  ۲. ارزیابی شاخص‌های شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص توسط خبرگان با استفاده از مقیاس‌های زبانی؛
  ۳. تبدیل ارزیابی‌های زبانی به اعداد فازی و محاسبه عدد اولویت ریسک فازی (FRPN)؛
  ۴. غیرفازی‌سازی مقادیر FRPN و اولویت‌بندی نهایی ریسک‌ها به‌عنوان ورودی مرحله تعیین وزن معیارها در FANP.
- به‌منظور افزایش اعتبار علمی ارزیابی‌های انجام‌شده در مراحل Fuzzy FMEA، FANP و تعیین پارامترهای روش ELECTRE III، از نظرات گروهی از خبرگان صنعت ریلی استفاده شد. جامعه خبرگان این پژوهش شامل ۴ گروه ۵ نفره از متخصصان حوزه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات ریلی، مدیران تعمیرات، کارشناسان ارشد برنامه‌ریزی نگهداری و متخصصان قابلیت اطمینان تجهیزات بود که همگی دارای تجربه مستقیم در بهره‌برداری، تعمیرات و مدیریت ماشین‌آلات سنگین ریلی بودند. میانگین سابقه فعالیت حرفه‌ای این افراد ۱۷ سال بود که بیانگر سطح بالای تخصص و تجربه عملی آنان در حوزه مورد مطالعه است. انتخاب خبرگان به‌صورت هدفمند (Purposive Sampling) و بر اساس معیارهای تخصصی انجام گرفت. معیارهای انتخاب شامل سابقه فعالیت در حوزه ماشین‌آلات روسازی ریلی، مشارکت مستقیم در بهره‌برداری یا نگهداری تجهیزات، آشنایی با سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) و مشارکت در تصمیم‌گیری‌های نگهداری و تعمیرات بود. به‌منظور کاهش سوءگیری‌های فردی، ارزیابی‌ها طی چند جلسه تخصصی انجام و اختلاف‌نظرها از طریق بحث گروهی تا دستیابی به اجماع برطرف شد. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، ترکیب خبرگان به گونه‌ای انتخاب شده است که تمامی سطوح عملیاتی، فنی و مدیریتی فرآیند نگهداری و تعمیرات را پوشش دهد. این نوع تخصصی موجب شده است ارزیابی ریسک‌ها صرفاً مبتنی بر دیدگاه بهره‌برداری یا تعمیرات نبوده و تمامی ابعاد عملکردی تجهیزات در فرآیند تحلیل لحاظ شود. همچنین استفاده از خبرگان با تجربه عملی قابل توجه، قابلیت اعتماد نتایج حاصل از تحلیل Fuzzy FMEA را افزایش داده است. مهم‌ترین معیارهای انتخاب عبارت بودند از:

- حداقل ۱۰ سال سابقه تخصصی در حوزه نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی؛
- تجربه مستقیم در بهره‌برداری، تعمیرات یا برنامه‌ریزی نگهداری ماشین‌آلات سرنده بالاست؛
- آشنایی کامل با سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) و شاخص‌های قابلیت اطمینان؛
- مشارکت در تصمیم‌گیری‌های فنی و مدیریتی مرتبط با انتخاب سیاست‌های نگهداری و تعمیرات.

پس از انتخاب خبرگان، پرسشنامه‌های مربوط به ارزیابی فازی ریسک‌ها، مقایسه‌های زوجی FANP و تعیین آستانه‌های روش ELECTRE III در اختیار آنان قرار گرفت. برای افزایش قابلیت اعتماد نتایج، ارزیابی‌ها طی چند مرحله بررسی و بازنگری شد و اختلاف نظرهای موجود از طریق جلسات تخصصی و تبادل نظر میان خبرگان برطرف گردید تا اجماع نهایی حاصل شود. سپس میانگین نظرات خبرگان به‌عنوان ورودی مدل‌های تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که پژوهش حاضر از روش اجماع نهایی از طریق بررسی‌های تکرارشونده، بحث‌های تخصصی و تأیید جمعی خبرگان حاصل شده است که در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر قضاوت خبرگان، رویکردی متداول و پذیرفته‌شده محسوب می‌شود. به‌منظور افزایش شفافیت روش‌شناسی، مشخصات کلی خبرگان مشارکت‌کننده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات خبرگان مشارکت‌کننده در ارزیابی ریسک و تصمیم‌گیری

Table 2. Characteristics of the Expert Panel

| گروه خبرگان                  | تعداد (نفر) | سابقه کاری (سال) | تحصیلات               | نقش در پژوهش                                 |
|------------------------------|-------------|------------------|-----------------------|----------------------------------------------|
| اپراتورهای ماشین‌آلات روسازی | 5           | 10-18            | دیپلم و کاردانی       | شناسایی حالات خرابی و ارزیابی قابلیت تشخیص   |
| تکنسین‌های تعمیرات           | 5           | 12-20            | کاردانی و کارشناسی    | ارزیابی احتمال وقوع خرابی و تحلیل تعمیرپذیری |
| مهندسان نگهداری و تعمیرات    | 5           | 15-25            | کارشناسی ارشد         | ارزیابی شدت پیامدها و تحلیل ریسک             |
| مدیران و خبرگان ارشد راه‌آهن | 5           | بیش از ۲۰        | دکتری و کارشناسی ارشد | اعتبارسنجی نتایج و تصمیم‌گیری نهایی          |
| جمع                          | 20          | میانگین ۱۷٫۶ سال | —                     | —                                            |

با توجه به محدودیت‌های شناخته‌شده FMEA کلاسیک، پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای بهبود فرآیند اولویت‌بندی ریسک توسعه داده‌اند. در پیوست B، جدول B1 مقایسه رویکردهای توسعه‌یافته FMEA و جایگاه پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

## ۳-۲- تعیین وزن ریسک‌ها با استفاده از FANP

پس از شناسایی و اولویت‌بندی اولیه حالت‌های خرابی با استفاده از Fuzzy FMEA، گام بعدی تعیین اهمیت نسبی ریسک‌ها و زیرریسک‌ها با در نظر گرفتن روابط متقابل میان آن‌ها است. اگرچه Fuzzy FMEA قادر است میزان بحرانی بودن هر حالت خرابی را در شرایط عدم قطعیت ارزیابی کند، اما همانند اغلب نسخه‌های توسعه‌یافته FMEA، وابستگی‌ها و اثرات متقابل میان عوامل ریسک را به‌صورت صریح مدل‌سازی نمی‌کند. در سامانه‌های پیچیده نگهداری و تعمیرات، به‌ویژه در تجهیزات روسازی ریلی، بسیاری از عوامل خرابی مستقل از یکدیگر نبوده و وقوع یا تشدید یک خرابی می‌تواند احتمال وقوع یا شدت سایر خرابی‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، نادیده گرفتن این وابستگی‌ها ممکن است منجر به برآورد غیرواقع‌بینانه اهمیت معیارها و در نهایت انتخاب نامناسب راهبرد نگهداری و تعمیرات شود [۱۰۵-۱۱۸].

به‌منظور رفع این محدودیت، در این پژوهش از فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی (FANP) استفاده شده است. FANP توسعه‌ای از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) است که با تلفیق منطق فازی، امکان مدل‌سازی هم‌زمان عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان و وابستگی‌های متقابل میان معیارها و زیرمعیارها را فراهم می‌کند [۱۱۹-۱۲۰]. برخلاف روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) که بر استقلال معیارها و ساختار سلسله‌مراتبی استوار است، FANP روابط بازخوردی و وابستگی‌های درونی و بیرونی و تأثیرات متقابل میان عناصر تصمیم را در قالب یک ساختار شبکه‌ای مدل می‌کند [۱۰۵-۱۱۰]. این ویژگی،

FANP را برای مسائل تصمیم‌گیری حوزه نگهداری و تعمیرات که دارای ساختارهای پیچیده و وابسته هستند، به روشی مناسب تبدیل کرده است.

مطالعات متعددی کارایی FANP را در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره تأیید کرده‌اند. Dagdeviren و همکاران [۱۰۸] نشان دادند که در نظر گرفتن وابستگی میان عوامل ریسک موجب افزایش دقت ارزیابی ریسک در سیستم‌های کاری می‌شود. Ayag و Ozdemir [۱۰۹] از FANP برای انتخاب طرح‌های مفهومی در توسعه محصول استفاده کردند و نقش آن را در تحلیل هم‌زمان معیارهای فنی و نیازهای مشتری نشان دادند. همچنین Guneri و همکاران [۱۱۲]، Yuksel و Dagdeviren [۱۱۴] و Zegordi و همکاران [۱۱۵] اثربخشی این روش را در مسائل تصمیم‌گیری پیچیده با معیارهای وابسته گزارش کرده‌اند. با وجود این، مرور ادبیات نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌های پیشین FANP را صرفاً به‌عنوان یک روش وزن‌دهی معیارها به کار گرفته‌اند و کمتر مطالعه‌ای آن را در قالب یک چارچوب یکپارچه با Fuzzy FMEA و ELECTRE III برای انتخاب راهبردهای نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک به کار برده است.

دلیل انتخاب FANP در این پژوهش، تنها ماهیت چندمعیاره مسئله نبوده است؛ بلکه توانایی این روش در مدل‌سازی روابط شبکه‌ای میان عوامل ریسک، انعکاس اثرات مستقیم و غیرمستقیم میان آن‌ها و مدیریت عدم قطعیت قضاوت‌های خبرگان، مهم‌ترین عامل انتخاب آن بوده است. در حالی که روش‌هایی نظیر AHP، TOPSIS یا سایر روش‌های مبتنی بر وزن‌دهی مستقل، معیارها را مستقل از یکدیگر فرض می‌کنند، FANP با در نظر گرفتن ساختار واقعی تعاملات میان ریسک‌ها، وزن‌هایی را تولید می‌کند که بیانگر اهمیت واقعی هر معیار در کل شبکه تصمیم هستند. این ویژگی موجب می‌شود وزن‌های استخراج‌شده، ورودی مناسب‌تری برای روش ELECTRE III باشند و فرآیند رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری و تعمیرات بر پایه اطلاعاتی جامع‌تر و واقع‌بینانه‌تر انجام گیرد.

در چارچوب پیشنهادی این پژوهش، خروجی مرحله Fuzzy FMEA شامل ریسک‌های اصلی و زیرریسک‌های شناسایی‌شده، به‌عنوان ورودی مدل FANP مورد استفاده قرار گرفت. سپس با انجام مقایسه‌های زوجی فازی و در نظر گرفتن روابط وابستگی میان معیارها، وزن نهایی هر ریسک و زیرریسک استخراج شد. این وزن‌ها در مرحله بعد به‌عنوان وزن معیارهای تصمیم وارد مدل ELECTRE III شدند تا رتبه‌بندی نهایی راهبردهای نگهداری و تعمیرات بر اساس اهمیت واقعی عوامل ریسک انجام شود.

### ۱-۲-۳- فرآیند پنج مرحله‌ای روش ANP

فرآیند تعیین وزن معیارها در این پژوهش بر اساس چارچوب ارائه‌شده توسط García-Melón و همکاران [۱۱۶] و در پنج گام اجرا شد:

#### گام اول: طراحی شبکه تصمیم

در این مرحله، بر اساس نتایج حاصل از Fuzzy FMEA و نظر خبرگان، ریسک‌های اصلی، زیرریسک‌ها و روابط وابستگی میان آن‌ها شناسایی و ساختار شبکه تصمیم تشکیل شد. این ساختار امکان نمایش وابستگی‌های درونی و بیرونی میان معیارها را فراهم می‌کند.

#### گام دوم: انجام مقایسه‌های زوجی فازی

پس از تعیین ساختار شبکه، مقایسه‌های زوجی میان عناصر وابسته با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی انجام شد [۱۱۷]. برای کاهش اثر عدم قطعیت در قضاوت‌های خبرگان، مقادیر مقایسه‌ها به اعداد فازی مثلثی تبدیل و وزن‌های محلی هر عنصر محاسبه شد [۱۱۱، ۱۲۱].

#### گام سوم: تشکیل ابرماتریس وزنی

وزن‌های محلی استخراج‌شده در قالب ابرماتریس اولیه سازمان‌دهی شدند. سپس با اعمال وزن خوشه‌ها، ابرماتریس وزنی تشکیل و نرمال‌سازی شد تا مجموع عناصر هر ستون برابر با یک باشد [۱۱۸].

#### گام چهارم: محاسبه ابرماتریس حد

برای لحاظ کردن تمامی اثرات مستقیم و غیرمستقیم میان عناصر شبکه، ابرماتریس وزنی به توان‌های متوالی رسانده شد تا به حالت پایدار همگرا شود. ابرماتریس حد، اثر تجمعی تمامی وابستگی‌های موجود در شبکه را نشان می‌دهد [۱۱۹، ۱۲۰].

#### گام پنجم: استخراج وزن‌های نهایی

در مرحله پایانی، وزن نهایی هر ریسک و زیرریسک از ابرماتریس حد استخراج شد. این وزن‌ها بیانگر اهمیت نسبی هر معیار پس از لحاظ نمودن تمامی روابط متقابل در شبکه بوده و به‌عنوان ورودی مدل ELECTRE III برای رتبه‌بندی راهبردهای نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار گرفتند.

### ۲-۳-۲-۳ ANP فازی

اگرچه ANP نسبت به AHP توانایی مدل‌سازی وابستگی‌ها و بازخورد میان معیارها را دارد، اما همانند اغلب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرض می‌کند که خبرگان قادرند ترجیحات خود را به‌صورت مقادیر قطعی بیان کنند. در مسائل نگهداری و تعمیرات، قضاوت خبرگان معمولاً با ابهام، عدم قطعیت و اطلاعات ناقص همراه است؛ بنابراین استفاده از مقادیر قطعی می‌تواند موجب کاهش دقت وزن‌های حاصل شود. به همین دلیل، در این پژوهش نسخه فازی ANP برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در مقایسه‌های زوجی به‌کار گرفته شد. منطق فازی که نخستین بار توسط Zadeh [۴۹] معرفی شد، امکان نمایش مفاهیم زبانی نظیر «اهمیت کم»، «اهمیت زیاد» و «اهمیت بسیار زیاد» را در قالب توابع عضویت فراهم می‌کند. در این پژوهش، برای نمایش قضاوت‌های خبرگان از اعداد فازی مثلثی (Triangular Fuzzy Numbers; TFNs) استفاده شد، زیرا این نوع اعداد ضمن برخورداری از سادگی محاسبات، در مطالعات ANP فازی بیشترین کاربرد را دارند [۱۲۳-۱۲۸].

مقایسه‌های زوجی خبرگان بر اساس مقیاس زبانی پیشنهادی ساعتی انجام شد که معادل فازی آن در جدول ۳ ارائه شده است. در صورتی که معیار  $i$  نسبت به معیار  $j$  دارای اهمیت بیشتری باشد، مقدار معکوس عدد فازی (معکوس  $(\frac{1}{c_1}, \frac{1}{b_1}, \frac{1}{a_1})$ )  $M^{-1}$  برای مقایسه معکوس در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳. طبقه‌بندی کیفی و کمی برای مقایسه زوجی در حالت فازی [۱۱۷]

Table 3. Qualitative and quantitative classification for pairwise comparison in fuzzy

| عدد فازی    | مقیاس زبانی  | مقیاس فازی مثلثی |
|-------------|--------------|------------------|
| $\tilde{1}$ | دقیقاً برابر | $(1, 1, 1)$      |

|            |                         |   |
|------------|-------------------------|---|
| (1, 2, 4)  | اهمیت برابر             | 2 |
| (1, 3, 5)  | اهمیت ضعیف یکی بر دیگری | 3 |
| (2, 4, 6)  | -                       | 4 |
| (3, 5, 7)  | اهمیت اساسی             | 5 |
| (4, 6, 8)  | اهمیت قوی               | 6 |
| (5, 7, 9)  | اهمیت بسیار قوی         | 7 |
| (6, 8, 10) | -                       | 8 |
| (7, 9, 11) | ترجیح شدید              | 9 |

در این مطالعه، برای استخراج وزن‌های فازی از روش تحلیل توسعه‌ای چانگ استفاده شد [۱۲۱]. این روش به دلیل سادگی محاسبات، قابلیت پیاده‌سازی و کاربرد گسترده در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره، یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه وزن در ANP فازی محسوب می‌شود.

مرحله اول: محاسبه مقادیر توسعه‌ای فازی

ابتدا برای هر معیار، مقدار توسعه‌ای فازی  $S_i$  با استفاده از روابط (۲) تا (۵) محاسبه شد. در این مرحله، مجموع اعداد فازی مربوط به هر معیار محاسبه و سپس معکوس مجموع کل اعداد فازی تعیین گردید تا مقدار توسعه‌ای هر معیار به دست آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_i^j \otimes \left[ \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m M_l^j \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m M_i^j = \left( \sum_{j=1}^m a_i, \sum_{j=1}^m b_i, \sum_{j=1}^m c_j \right) \quad (3)$$

و برای به دست آوردن  $\left[ \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m M_l^j \right]^{-1}$ ، عملیات جمع فازی مقادیر  $M_i^j (j = 1, 2, \dots, m)$  به گونه‌ای انجام می‌شود که:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_i^j = \left( \sum_{j=1}^m a_i, \sum_{j=1}^m b_i, \sum_{j=1}^m c_j \right) \quad (4)$$

و سپس معکوس بردار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\left[ \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m M_l^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n c_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \right) \quad (5)$$

مرحله دوم: تعیین درجه امکان  $(M_1 \geq M_2)$

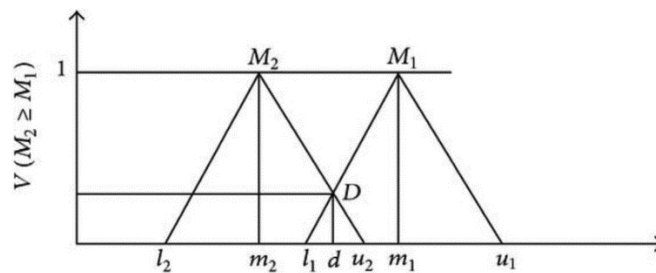
پس از محاسبه مقادیر توسعه‌ای، میزان برتری هر معیار نسبت به سایر معیارها از طریق مفهوم درجه امکان محاسبه شد. این شاخص احتمال برتری یک عدد فازی نسبت به عدد فازی دیگر را اندازه‌گیری می‌کند و بر اساس روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود.

$$V(M_1 \geq M_2) = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad (6)$$

و می‌تواند به صورت معادل به صورت زیر بیان شود:

$$V(M_1 \geq M_2) = hgt(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{if } b_1 \geq b_2 \\ 0, & \text{if } a_2 \geq c_1 \\ \frac{c_1 - a_2}{(c_1 - a_2) - (b_2 - b_1)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن  $d$ ، مختص بالاترین نقطه تقاطع  $D$  بین  $\mu_{M_1}$  و  $\mu_{M_2}$  است. برای مقایسه  $M_1$  و  $M_2$ ، هر دو مقدار  $V(M_1 \geq M_2)$  و  $V(M_2 \geq M_1)$  مورد نیاز است. شکل ۲ نحوه محاسبه درجه امکان از طریق تقاطع دو عدد فازی مثلثی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تقاطع بین  $M$  و  $M_1$

Figure 2. The intersection between  $M_1$  and  $M_2$

مرحله سوم: استخراج بردار وزن اولیه

در این مرحله، حداقل درجه امکان هر معیار نسبت به سایر معیارها مطابق روابط (۸) تا (۱۰) محاسبه شد. حاصل این مرحله، بردار وزن اولیه فازی است که بیانگر اهمیت نسبی معیارهای تصمیم‌گیری پیش از نرمال‌سازی می‌باشد. درجه امکان برای یک عدد فازی محدب که بزرگتر از  $k$  عدد فازی محدب  $M_i (i = 1, 2, \dots, k)$  باشد را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_k)] \\ = \min V(M \geq M_i), i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (8)$$

فرض کنید:

$$\hat{d}(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad (9)$$

برای  $k=1, 2, \dots, n; k \neq i$  سپس بردار وزن به صورت زیر داده می‌شود:

$$\hat{W} = (\hat{d}(A_1), \hat{d}(A_2), \dots, \hat{d}(A_n))^T \quad (10)$$

که در آن  $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$  عنصر تصمیم هستند.

مرحله چهارم: نرمال‌سازی وزن‌ها

در نهایت، بردار وزن اولیه با استفاده از رابطه (۱۱) نرمال شد تا مجموع وزن معیارها برابر یک شود. وزن‌های حاصل، وزن نهایی ریسک‌های اصلی و زیرریسک‌ها را تشکیل می‌دهند و به عنوان ورودی مدل ELECTRE III مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (11)$$

که در آن  $W$  یک عدد غیرفازی است.

در پژوهش حاضر، تمامی مقایسه‌های زوجی توسط تیم خبرگان معرفی شده در بخش قبل انجام شد. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی، وزن‌های نهایی ریسک‌ها و زیرریسک‌ها با استفاده از روش فوق استخراج شدند و به عنوان ضرایب اهمیت معیارها در مرحله رتبه‌بندی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات به مدل ELECTRE III منتقل شدند. این فرآیند موجب شد علاوه بر اهمیت مستقل هر ریسک، وابستگی‌های متقابل میان آنها نیز در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شود.

### ۳-۳- ELECTRE III برای اولویت‌بندی گزینه‌ها و رتبه‌بندی استراتژی‌ها

پس از تعیین وزن ریسک‌ها توسط ANP فازی، مرحله نهایی پژوهش به انتخاب مناسب‌ترین استراتژی نگهداری و تعمیرات اختصاص یافت. از میان خانواده روش‌های ELECTRE، نسخه ELECTRE III به دلیل توانایی مدل‌سازی ترجیحات تصمیم‌گیرندگان، استفاده از آستانه‌های بی‌تفاوتی، ترجیح و وتو، و همچنین قابلیت مدیریت اطلاعات ناقص و غیرقطعی، برای این پژوهش انتخاب شد [۱۲۲، ۱۲۴].

برخلاف بسیاری از روش‌های جبرانی تصمیم‌گیری چندمعیاره، ELECTRE III اجازه نمی‌دهد عملکرد ضعیف یک گزینه در یک معیار مهم، صرفاً از طریق عملکرد مناسب در سایر معیارها جبران شود. این ویژگی سبب می‌شود نتایج حاصل با واقعیت تصمیم‌گیری در سیستم‌های نگهداری و تعمیرات سازگاری بیشتری داشته باشد؛ زیرا در چنین سیستم‌هایی برخی معیارهای بحرانی، مانند ایمنی یا قابلیت اطمینان، نقش غیرقابل جایگزینی دارند.

فرض کنید  $A = (a, b, c, \dots, n)$  مجموعه‌ای از گزینه‌ها و  $(g_1, g_2, \dots, g_m)$  مجموعه‌ای از معیارها برای یک مسئله MCDM باشد؛  $g_j(a_j)$  نشان‌دهنده عملکرد یا ارزیابی گزینه  $a \in A$  برای معیار  $g_j$  است.

بسته به اینکه هدف حداکثرسازی یا حداقل‌سازی معیار  $g_j(a_j)$  باشد، هرچه مقدار بیشتر یا کمتر باشد، گزینه مذکور معیار فوق را بهتر برآورده می‌کند. در نتیجه، ارزیابی چندمعیاره گزینه  $a \in A$  توسط بردار  $g(a) = (g_1(a), g_2(a), \dots, g_m(a))$  نشان داده خواهد شد. فرض کنید  $q(g)$  و  $p(g)$  ترتیب نشان‌دهنده آستانه‌های بی‌تفاوتی و ترجیح هستند [۱۲۳].

برای مدل‌سازی ترجیحات تصمیم‌گیرنده، سه آستانه برای هر معیار تعریف می‌شود:

- آستانه بی‌تفاوتی ( $q$ )
- آستانه ترجیح ( $p$ )
- آستانه وتو ( $v$ )

این آستانه‌ها بر اساس داده‌های تاریخی تعمیرات، شاخص‌های عملکرد تجهیزات و قضاوت خبرگان تعیین شدند.

اگر  $g(a) \geq g(b)$ ، سپس:

$$g(a) > g(b) + p(g(b)) \Leftrightarrow aPb \quad (12)$$

$$g(b) + q(g(b)) < g(a) < g(b) + p(g(b)) \Leftrightarrow aQb \quad (13)$$

$$g(b) < g(a) < g(b) + q(g(b)) \Leftrightarrow aIb, \quad (14)$$

که در آن  $P$  نشان‌دهنده ترجیح قوی،  $Q$  نشان‌دهنده ترجیح ضعیف،  $I$  نشان‌دهنده بی‌تفاوتی، و  $g(a)$  مقدار معیار گزینه  $a$  است.

پس از تعریف آستانه‌ها، فرآیند ELECTRE III شامل چهار مرحله اصلی است:

**مرحله اول:** محاسبه شاخص توافق مطابق روابط (۱۵) و (۱۶). شاخص توافق  $C(a, b)$  برای هر جفت از گزینه‌ها محاسبه می‌شود:

$$C(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^m W_i C_i(a, b)}{\sum_{i=1}^m W_i}, \quad (15)$$

که در آن  $C_i(a, b)$  درجه برتری گزینه  $a$  و گزینه  $b$  تحت معیار  $i$  است، و:

$$C_i(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_i(b) - g_i(a) > p_i(g_i(a)) \\ 1 & \text{if } g_i(b) - g_i(a) > q_i(g_i(a)) \\ \frac{p_i + g_i(a) - g_i(b)}{p_i - q_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

بنابراین،  $0 \leq C_i(a, b) \leq 1$ .

**مرحله دوم:** محاسبه شاخص عدم توافق یعنی  $d(a, b)$  برای هر معیار و اعمال شرط وتو بر اساس روابط (۱۷) تا (۱۹).

آستانه وتو  $v_i(g_i(b))$  برای هر معیار  $i$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_i(g_i(a)) = \alpha_v + \beta_v g_i(a) \quad (17)$$

آستانه وتو  $v_i$  این امکان را فراهم می‌کند که  $aSb$  به طور کامل رد شود اگر برای هر معیار  $j$ ،

$$g_i(b) > g_i(a) + v_i \quad (18)$$

باشد.

$$d_i(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_i(b) - g_i(a) \leq p_i(g_i(a)) \\ 1 & \text{if } g_i(b) - g_i(a) > v_i(g_i(a)) \\ \frac{g_i(b) - g_i(a) - p_i}{v_i - p_i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

بنابراین،  $0 \leq d_i(a, b) \leq 1$ .

مرحله سوم: محاسبه درجه اعتبار رابطه برتری (Credibility Index) یعنی  $S(a, b)$  مطابق رابطه (۲۰) که نتیجه تلفیق شاخص‌های توافق و عدم توافق است.

$$(a, b) = \begin{cases} c(a, b) & \text{if } d_j(a, b) \leq c(a, b) \quad \forall j \in J \\ c(a, b) \times \prod_{j \in J(a, b)} \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - c(a, b)} & \text{other wise} \end{cases} \quad (20)$$

که در آن  $J(a, b)$  مجموعه معیارهایی است که برای آنها  $d_j(a, b) > c(a, b)$  است [۱۲۳].

مرحله چهارم: اجرای فرآیند تقطیر صعودی و نزولی برای استخراج رتبه نهایی گزینه‌ها بر اساس رابطه (21). ترتیب جزئی نهایی گزینه‌ها بر اساس این دو ترتیب کامل ساخته می‌شود. فرآیند تقطیر نزولی به شرح زیر است:

فرض کنید  $\lambda = \max_{x_i, x_j} S(x_i, x_j)$  یک "مقدار اعتبار" تعیین کنید به طوری که تنها مقادیر  $S(x_i, x_j)$  که به اندازه کافی به  $\lambda$  نزدیک هستند در نظر گرفته شوند؛ یعنی  $\lambda - S(\lambda)$ . بنابراین اگر  $\lambda = 1$ ، فرض کنید  $s(\lambda) = 0.15$ . ماتریس  $T$  را به صورت زیر تعریف کنید:

$$T(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{if } S(a, b) > \lambda - s(\lambda) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

در این پژوهش، وزن معیارها از خروجی ANP فازی دریافت شد و به عنوان ورودی مدل ELECTRE III مورد استفاده قرار گرفت. در نتیجه، رتبه‌بندی نهایی استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات نه تنها بر مبنای عملکرد هر گزینه، بلکه با در نظر گرفتن اهمیت نسبی و وابستگی متقابل ریسک‌های شناسایی شده انجام شد.

### ۳.۴. مطالعه موردی و گردآوری داده‌ها

به منظور اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی، مطالعه حاضر در شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران و بر روی دستگاه سرند بالاست<sup>۱</sup> (BCM) انجام شد. این تجهیز یکی از ماشین‌آلات راهبردی نگهداری خطوط ریلی محسوب می‌شود که وظیفه حذف بالاست آلوده، بازیابی مصالح و بازگرداندن کیفیت هندسی بستر خط را بر عهده دارد. به دلیل شرایط کاری سخت، بارهای دینامیکی، ارتعاشات مداوم و پیچیدگی سامانه‌های مکانیکی، هیدرولیکی و پنوماتیکی، خرابی این تجهیز سهم قابل توجهی در کاهش دسترس‌پذیری ماشین‌آلات نگهداری خطوط دارد. از این رو، انتخاب سیاست مناسب نگهداری و تعمیرات برای این تجهیز از اهمیت اقتصادی و عملیاتی بالایی برخوردار است. براساس اطلاعات واحد نگهداری و تعمیرات، هزینه ناشی از توقف برنامه‌ریزی نشده هر دستگاه حدود 3500 دلار در روز برآورد شد. با فرض بهره‌برداری متوسط 300 روز در سال، هزینه سالانه ناشی از توقف هر دستگاه حدود 1.05 میلیون دلار است. با توجه به وجود هشت دستگاه فعال در شبکه ریلی ایران، انتخاب یک سیاست نگهداری نامناسب می‌تواند زیانی در حدود ۸/۴ تا ۸/۵ میلیون دلار در سال ایجاد کند. این موضوع ضرورت استفاده از یک چارچوب تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک را برای انتخاب سیاست نگهداری و تعمیرات نشان می‌دهد. مطالعه موردی حاضر با دو هدف اصلی انجام شد:

<sup>1</sup> Ballast Cleaning Machine

۱. شناسایی، طبقه‌بندی و اولویت‌بندی ریسک‌های خرابی دستگاه سرند بالاست؛

۲. انتخاب مناسب‌ترین استراتژی نگهداری و تعمیرات با استفاده از چارچوب ترکیبی Fuzzy FMEA–Fuzzy ANP–ELECTRE III.

در مرحله نخست، داده‌های خرابی و سوابق تعمیرات طی پنج سال از سامانه مدیریت نگهداری و تعمیرات (CMMS) راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران استخراج شد. بازه زمانی مطالعه شامل پنج سال متوالی بوده و تمامی سوابق ثبت‌شده مربوط به دستگاه سرند بالاست مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات استخراج‌شده شامل کلیه سوابق خرابی، دستورکارهای تعمیراتی، زمان‌های توقف تجهیزات، زمان‌های تعمیر، قطعات معیوب، علل ثبت‌شده خرابی و اطلاعات عملکردی تجهیزات و گزارش‌های کارشناسی بود. پس از استخراج داده‌ها، فرآیند پاک‌سازی داده‌ها شامل حذف رکوردهای ناقص، اصلاح داده‌های ناسازگار، حذف ثبت‌های تکراری و یکسان‌سازی کدهای خرابی انجام شد تا پایگاه داده نهایی برای تحلیل آماده گردد.

در ادامه، داده‌های پالایش‌شده به کمک تحلیل پارتو، نمودار علت و معلول و نظرات خبرگان طی چند جلسه خبرگی با حضور متخصصان بهره‌برداری، تعمیرات و برنامه‌ریزی نگهداری مورد بررسی و اعتبارسنجی واقع شد و تنها خرابی‌هایی که بیشترین سهم را در کاهش قابلیت اطمینان تجهیز داشتند، برای تحلیل Fuzzy FMEA انتخاب شدند. در این مطالعه، هدف استفاده از داده‌های تاریخی صرفاً محاسبه فراوانی خرابی نبود، بلکه استخراج الگوهای خرابی مؤثر بر شاخص‌های قابلیت اطمینان نظیر MTBF و MTTR و تبدیل آنها به ورودی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره بود. بر مبنای این فرآیند، پنج گروه اصلی ریسک که بیشترین سهم را در خرابی دستگاه داشتند، شناسایی شدند که در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

#### جدول ۴. ریسک‌های اصلی در تجهیزات بحرانی

Table 4. Main Risks in Critical Equipment

| کد | گروه ریسک                 | شرح                                 |
|----|---------------------------|-------------------------------------|
| X1 | سیستم موتور دیزل          | اجزای تولید توان موتور              |
| X2 | سیستم هیدرولیک            | اجزای انتقال و کنترل توان هیدرولیکی |
| X3 | سیستم انتقال مواد         | تجهیزات انتقال، سرند و زنجیرها      |
| X4 | سیستم پنوماتیک و ترمز     | سامانه هوای فشرده و کنترل ترمز      |
| X5 | سیستم انتقال قدرت مکانیکی | گیربکس‌ها، دیفرانسیل و محورهای محرک |

پس از تعیین گروه‌های اصلی ریسک، برای هر گروه حالت‌های خرابی و اجزای بحرانی استخراج شد. این زیرریسک‌ها بر اساس تحلیل سوابق خرابی، جلسات خبرگی و بررسی ارتباط آنها با شاخص‌های قابلیت اطمینان MTBF و MTTR انتخاب شدند. زیرریسک‌هایی که تأثیر معناداری بر عملکرد تجهیز نداشتند یا ارتباط مستقیمی با قابلیت دسترسی‌پذیری سیستم نداشتند، از مدل حذف شدند تا از افزایش غیرضروری پیچیدگی جلوگیری شود. فهرست نهایی زیرریسک‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

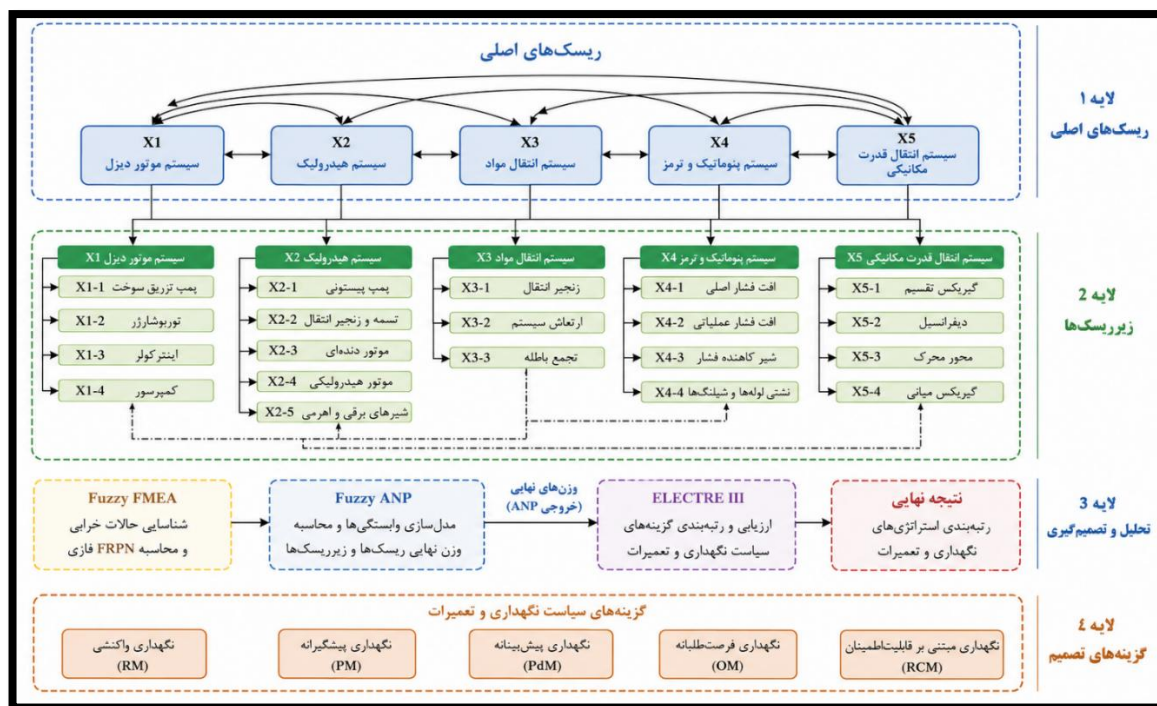
#### جدول ۵. ریسک‌ها و زیرریسک‌های تجهیزات

Table 5. Risks and sub-risks of equipment

| گروه ریسک           | کد   | زیرریسک        |
|---------------------|------|----------------|
| X1 سیستم موتور دیزل | X1-1 | پمپ تزریق سوخت |
|                     | X1-2 | توربوشارژر     |
|                     | X1-3 | اینترکولر      |

|                         |      |                              |
|-------------------------|------|------------------------------|
| کمپرسور                 | X1-4 |                              |
| پمپ پیستونی             | X2-1 | X2 سیستم هیدرولیک            |
| تسمه و زنجیر انتقال     | X2-2 |                              |
| موتور دنده‌ای           | X2-3 |                              |
| موتور هیدرولیک          | X2-4 |                              |
| شیرهای برقی و اهرمی     | X2-5 |                              |
| زنجیر انتقال            | X3-1 | X3 سیستم انتقال مواد         |
| ارتعاش سیستم            | X3-2 |                              |
| بوم ضایعات              | X3-3 |                              |
| افت فشار اصلی           | X4-1 | X4 سیستم پنوماتیک و ترمز     |
| افت فشار عملیاتی        | X4-2 |                              |
| شیر کاهنده فشار         | X4-3 |                              |
| نشتی شیلنگ‌ها و لوله‌ها | X4-4 |                              |
| گیربکس تقسیم            | X5-1 | X5 سیستم انتقال قدرت مکانیکی |
| دیفرانسیل               | X5-2 |                              |
| محور محرک               | X5-3 |                              |
| گیربکس میانی            | X5-4 |                              |

در ادامه، Fuzzy FMEA برای محاسبه FRPN هر زیرریسک به کار گرفته شد تا اثر عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان در فرآیند ارزیابی لحاظ شود. سپس، با توجه به وجود وابستگی‌های متقابل میان گروه‌های ریسک و زیرریسک‌ها، وزن نسبی هر عامل با استفاده از Fuzzy ANP استخراج شد. در مرحله نهایی، وزن‌های حاصل از ANP فازی به عنوان ورودی مدل ELECTRE III مورد استفاده قرار گرفت. پنج گزینه سیاست نگهداری شامل نگهداری واکنشی (RM)، نگهداری پیشگیرانه (PM)، نگهداری پیش‌بینانه (PdM)، نگهداری فرصت‌طلبانه (OM) و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) با استفاده از روابط برتری‌سازی، شاخص‌های توافق و عدم توافق و آستانه‌های ترجیح، بی‌تفاوتی و وتو ارزیابی شدند. این فرآیند امکان رتبه‌بندی نهایی استراتژی‌های نگهداری را بر اساس شرایط واقعی بهره‌برداری از دستگاه سرند بالاست فراهم می‌کند. شکل ۳ ساختار شبکه روابط میان ریسک‌های اصلی، زیرریسک‌ها و نحوه انتقال اطلاعات از مرحله تحلیل ریسک به مرحله تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۳- روابط بین ریسک‌های اصلی و زیرریسک‌ها

Figure 3. Relationships between main risks and sub risks

#### ۴. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای چارچوب یکپارچه Fuzzy FMEA–FANP–ELECTRE III بر روی ماشین سرنند بالاست راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران ارائه و تحلیل می‌شود. برخلاف مطالعاتی که صرفاً به ارائه رتبه‌بندی ریسک‌ها اکتفا می‌کنند، در این پژوهش خروجی هر مرحله از منظر فنی، مدیریتی و تصمیم‌گیری مورد تفسیر قرار گرفته و ارتباط منطقی میان مراحل مختلف مدل تشریح شده است. به منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج، تحلیل بر پایه داده‌های واقعی پنج‌ساله استخراج‌شده از سیستم مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) انجام شده و علاوه بر ارزیابی اولیه ریسک‌ها، وابستگی‌های متقابل میان آن‌ها نیز از طریق FANP لحاظ گردیده است. در نهایت، به منظور ارزیابی استحکام مدل پیشنهادی، تحلیل حساسیت بر روی وزن معیارها و رتبه‌بندی نهایی انجام شده است.

##### ۴-۱- نتایج FMEA فازی

در این پژوهش، روش (Fuzzy FMEA) به عنوان نخستین مرحله چارچوب پیشنهادی به منظور شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی اولیه ریسک‌های مؤثر بر قابلیت اطمینان ماشین سرنند بالاست به کار گرفته شد. برخلاف FMEA کلاسیک که به دلیل استفاده از مقادیر قطعی قادر به مدل‌سازی عدم قطعیت قضاوت خبرگان نیست، استفاده از اعداد فازی امکان لحاظ نمودن ابهام موجود در ارزیابی‌های انسانی را فراهم نمود و موجب افزایش دقت فرآیند تصمیم‌گیری گردید. تحلیل بر پایه داده‌های واقعی پنج‌ساله استخراج‌شده از سامانه مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران انجام شد. این پایگاه داده شامل سوابق خرابی، مدت زمان توقف، نوع خرابی، هزینه تعمیرات و اطلاعات مربوط به عملیات تعمیراتی بود. استفاده از داده‌های

بلندمدت باعث شد نتایج حاصل صرفاً متکی بر قضاوت خبرگان نبوده و رفتار واقعی سیستم نیز در مدل لحاظ گردد؛ موضوعی که یکی از نقاط قوت اصلی چارچوب پیشنهادی محسوب می‌شود.

## گام ۱: شناسایی ریسک‌ها

در نخستین مرحله، ریسک‌های بالقوه مؤثر بر عملکرد ماشین سرند بالاست شناسایی شدند. برای این منظور، اطلاعات مربوط به بیش از پنج سال سوابق تعمیرات، خرابی‌ها، توقفات اضطراری و فعالیت‌های نگهداری از پایگاه داده CMMS استخراج و تحلیل گردید. استفاده از داده‌های واقعی عملیاتی موجب شد فرآیند شناسایی ریسک‌ها صرفاً مبتنی بر قضاوت ذهنی خبرگان نبوده و رفتار واقعی تجهیزات نیز در مدل لحاظ شود؛ موضوعی که یکی از مزیت‌های اصلی چارچوب پیشنهادی نسبت به مطالعات مشابه محسوب می‌شود. به منظور اطمینان از جامعیت شناسایی ریسک‌ها، فرآیند تحلیل در سه مرحله انجام شد. ابتدا با استفاده از نمودار پارتو، تجهیزاتی که بیشترین سهم را در توقفات و هزینه‌های تعمیرات داشتند مشخص شدند. سپس از نمودار علت و معلول و تحلیل علل ریشه‌ای برای استخراج عوامل اصلی خرابی استفاده گردید. در نهایت، نتایج حاصل با طبقه‌بندی تجهیزات مطابق استاندارد ISO 14224:2016 تطبیق داده شد تا ساختار نهایی ریسک‌ها تدوین گردد.

نتیجه این فرآیند، شناسایی پنج گروه اصلی ریسک شامل سیستم موتور (Sys.1)، سیستم هیدرولیک (Sys.2)، شاسی بدنه (Sys.3)، سیستم ارتعاش (Sys.4) و سیستم انتقال قدرت (Sys.5) به همراه بیست زیرریسک متناظر بود که در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. طبقه‌بندی انجام‌شده در جداول مذکور نشان می‌دهد که بخش عمده خرابی‌های ماشین سرند بالاست به پنج زیرسیستم حیاتی محدود می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که علی‌رغم پیچیدگی ساختار ماشین، تعداد محدودی از تجهیزات مسئول بخش عمده توقف‌های عملیاتی هستند. از دیدگاه مدیریت نگهداری، چنین تمرکزی امکان تخصیص هدفمند منابع، قطعات یدکی و برنامه‌های تعمیراتی را فراهم می‌کند. همچنین استفاده از نمودارهای پارتو نشان داد که بیش از ۸۰ درصد توقفات ثبت‌شده ناشی از خرابی تجهیزات همین پنج سیستم بوده است؛ بنابراین حذف سایر اجزا از مدل تصمیم‌گیری، موجب کاهش دقت نتایج نشده و صرفاً باعث کاهش پیچیدگی مدل گردیده است. در ادامه، ریسک‌های شناسایی‌شده با استفاده از روش Fuzzy FMEA ارزیابی و اولویت‌بندی شدند.

## گام ۲: ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها با Fuzzy FMEA

پس از شناسایی ریسک‌های اصلی و زیرریسک‌ها، شدت (Severity)، احتمال وقوع (Occurrence) و قابلیت تشخیص (Detection) هر حالت خرابی توسط چهار تیم تخصصی FMEA ارزیابی گردید. به منظور کاهش عدم قطعیت موجود در قضاوت خبرگان، ارزیابی‌ها با استفاده از متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی و دوزنقه‌ای مطابق استاندارد ISO 14224:2016 [۱۲۹، ۱۳۰] انجام شد.

امتیازات ارائه شده توسط خبرگان ابتدا تجمیع شدند و سپس با استفاده از روش مرکز سطح غیرفازی‌سازی گردیدند تا مقدار نهایی FRPN برای هر ریسک محاسبه شود. نتایج ارزیابی ریسک‌های اصلی در جداول ۷ تا ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۶ بیانگر ارزیابی زبانی خبرگان از پنج سیستم اصلی دستگاه سرند بالاست است. بررسی این جدول نشان می‌دهد که سیستم‌های Sys.1 و Sys.5 در اغلب معیارهای وقوع و شدت دارای ارزیابی‌های Very High هستند، در حالی که سیستم‌های Sys.2 و Sys.3 در برخی معیارها مقادیر متوسط یا پایین دریافت کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، خرابی‌های موتور و سیستم انتقال قدرت علاوه بر فراوانی وقوع، دارای پیامدهای عملیاتی شدیدتری نیز هستند.

## جدول ۶. ریسک‌های اصلی بر اساس اعضای تیم FMEA

Table 6. Main risks based on FMEA team members

| ریسک‌های اصلی تجهیزات |        |        |        |        | FMEA      | فاکتور ریسک |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|-------------|
| Sys. 1                | Sys. 2 | Sys. 3 | Sys. 4 | Sys. 5 |           |             |
| H                     | VH     | L      | L      | VH     | T 1 (10%) | وقوع (O)    |
| VH                    | H      | M      | VH     | H      | T 2 (25%) |             |
| H                     | VH     | M      | H      | H      | T 3 (30%) |             |
| VH                    | H      | H      | M      | M      | T 4 (35%) |             |
| VH                    | VL     | M      | VH     | HWW    | T 1 (10%) | شدت (S)     |
| VH                    | L      | VH     | HWW    | HWOW   | T 2 (25%) |             |
| HWW                   | MR     | M      | H      | HWW    | T 3 (30%) |             |
| HWOW                  | L      | VH     | VH     | HWOW   | T 4 (35%) |             |
| R                     | AC     | H      | M      | VR     | T 1 (10%) | تشخیص (D)   |
| VR                    | VH     | VH     | MH     | VL     | T 2 (25%) |             |
| AU                    | AC     | AC     | L      | R      | T 3 (30%) |             |
| VR                    | AC     | VH     | L      | VR     | T 4 (35%) |             |

جدول ۷ میانگین فازی مقادیر O، S و D را نشان می‌دهد. مقادیر این جدول نشان می‌دهد که Sys.1 دارای بیشترین مقدار شدت و قابلیت تشخیص دشوار است. Sys.5 نیز شدت بسیار بالایی دارد. Sys.2 اگرچه احتمال وقوع نسبتاً بالایی دارد اما شدت آن پایین‌تر است. در نتیجه انتظار می‌رود که پس از غیرفازی‌سازی، این دو سیستم در اولویت بالاتری قرار گیرند.

جدول ۷. میانگین ارزیابی فازی ۵ حالت خرابی ریسک اصلی بر اساس RPN

Table 7. The fuzzy evaluating average of 5 main risk failure modes based on RPN

| RPN   | تشخیص (D)                 | شدت (S)                     | وقوع (O)                           | ریسک اصلی |
|-------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------|
| 689   | $(8.2, 9.2, 9.9) = 9.1$   | $(8.9, 9.65) = 8.883$       | $(7.2, 8.2, 9.2, 9.6) = 8.529$     | Sys. 1    |
| 52.79 | $(1.1, 1.25, 2.25) = 1.5$ | $(3.3, 4.3, 5.3) = 4.3$     | $(6.8, 7.8, 8.8, 9.4) = 8.185$     | Sys. 2    |
| 76.95 | $(1.1, 1.8, 2.8) = 1.9$   | $(6.2, 7.2, 8.2) = 7.2$     | $(3.85, 4.85, 6.4, 7.4) = 5.625$   | Sys. 3    |
| 281   | $(4.4, 5.4, 6.4) = 5.4$   | $(6.95, 7.95, 8.95) = 7.95$ | $(4.95, 5.95, 7.3, 8.05) = 6.5543$ | Sys. 4    |
| 522   | $(7.2, 8.2, 9.2) = 8.2$   | $(8.6, 9.6, 10) = 9.4$      | $(5.15, 6.05, 7.5, 8.4) = 6.775$   | Sys. 5    |

جدول ۸ نتایج غیرفازی‌سازی را نشان می‌دهد. این رتبه‌بندی بیانگر این است که خرابی‌های مرتبط با موتور بیشترین اثر را بر قابلیت اطمینان دستگاه دارند. علت این موضوع آن است که خرابی موتور مستقیماً موجب توقف کامل عملیات غربال‌گری بالاست شده و زمان تعمیر (MTTR) را به طور محسوسی افزایش می‌دهد، در حالی که بسیاری از خرابی‌های سیستم‌های دیگر تنها موجب کاهش عملکرد می‌شوند. این یافته با داده‌های واقعی CMMS طی دوره پنج ساله نیز سازگار است و نشان می‌دهد موتور بحرانی‌ترین تجهیز دستگاه محسوب می‌شود.

جدول ۸. غیرفازی‌سازی RPN فازی برای پنج ریسک اصلی

Table 8. The Defuzzification of fuzzy RPN for five main risks

| RPN | تشخیص (D) | شدت (S) | وقوع (O) | ریسک اصلی |
|-----|-----------|---------|----------|-----------|
| 689 | 9.1       | 8.883   | 8.529    | Sys. 1    |

|       |     |      |        |        |
|-------|-----|------|--------|--------|
| 52.79 | 1.5 | 4.3  | 8.185  | Sys. 2 |
| 76.95 | 1.9 | 7.2  | 5.625  | Sys. 3 |
| 281   | 5.4 | 7.95 | 6.5543 | Sys. 4 |
| 522   | 8.2 | 9.4  | 6.775  | Sys. 5 |

پس از تعیین اولویت ریسک‌های اصلی، تحلیل در سطح زیرریسک‌ها انجام شد. جدول ۹ ارزیابی خبرگان برای زیرریسک‌های سیستم موتور را نشان می‌دهد.

جدول ۹. ارزیابی زیرریسک‌های Sys. 1 بر اساس اعضای تیم FMEA

Table 9. Evaluating of Sys. 1 sub-risks based on FMEA team members

| ریسک‌های حالت خرابی |      |      |      | FMEA      | ضریب ریسک |
|---------------------|------|------|------|-----------|-----------|
| X1-1                | X1-2 | X1-3 | X1-4 |           |           |
| H                   | H    | L    | VH   | T 1 (10%) | وقوع (O)  |
| VH                  | VH   | H    | H    | T 2 (25%) |           |
| H                   | M    | M    | VH   | T 3 (30%) |           |
| VH                  | H    | M    | VH   | T 4 (35%) |           |
| L                   | VH   | VL   | M    | T 1 (10%) | شدت (S)   |
| M                   | VH   | L    | L    | T 2 (25%) |           |
| H                   | HWV  | M    | H    | T 3 (30%) |           |
| M                   | HWOW | L    | M    | T 4 (35%) |           |
| H                   | R    | M    | L    | T 1 (10%) | تشخیص (D) |
| MH                  | VL   | H    | M    | T 2 (25%) |           |
| VH                  | R    | MH   | MH   | T 3 (30%) |           |
| H                   | VR   | MH   | M    | T 4 (35%) |           |

مطابق جدول ۱۰، زیرریسک X1-2 (توربوشارژر) دارای بیشترین FRPN در بین زیرریسک‌های موتور است، در حالی که X1-3 کمترین مقدار را دارد.

جدول ۱۰. میانگین ارزیابی فازی حالت‌های خرابی زیرریسک‌های Sys. 1 بر اساس RPN

Table 10. The fuzzy evaluating average of Sys. 1 sub-risks failure modes based on RPN

| RPN     | تشخیص (D)                   | شدت (S)                     | وقوع (O)                         | حالت خرابی |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------|
| 156.003 | $(1.95, 2.95, 3.95) = 2.95$ | $(5.2, 6.2, 7.2) = 6.2$     | $(7.2, 8.2, 9.2, 9.6) = 8.529$   | X1-1       |
| 516.573 | $(7.1, 8.1, 9.1) = 8.1$     | $(8, 9, 9.65) = 8.883$      | $(5.6, 6.6, 7.9, 8.65) = 7.179$  | X1-2       |
| 107.608 | $(2.85, 3.85, 4.85) = 3.85$ | $(4.2, 5.2, 6.2) = 5.2$     | $(3.55, 4.55, 6.2, 7.2) = 5.375$ | X1-3       |
| 255.217 | $(3.8, 4.8, 5.8) = 4.8$     | $(5.05, 6.05, 7.05) = 6.05$ | $(7.5, 8.5, 9.5, 9.75) = 8.788$  | X1-4       |

پس از غیرفازی‌سازی که در جدول ۱۱ ارائه شده است، نتایج نشان داد که X1-2، X1-3، X5-2 بیشترین مقدار FRPN را در کل تجهیزات دارند. از دیدگاه مهندسی تعمیرات، این نتیجه قابل انتظار است؛ زیرا این سه مؤلفه مستقیماً بر تولید توان، انتقال نیرو و پایداری عملکرد دستگاه اثرگذار هستند و خرابی آن‌ها منجر به توقف کامل عملیات می‌شود.

جدول ۱۱. غیرفازی‌سازی RPN فازی کل زیرریسک‌ها

Table 11 -Defuzzification of total sub-risks Fuzzy RPN

| FRPN    | تشخیص (D) | شدت (S) | وقوع (O) | زیرریسک |
|---------|-----------|---------|----------|---------|
| 156.003 | 2.95      | 6.2     | 8.529    | X1-1    |
| 516.573 | 8.1       | 8.883   | 7.179    | X1-2    |
| 107.608 | 3.85      | 5.2     | 5.375    | X1-3    |
| 255.217 | 4.8       | 6.05    | 8.788    | X1-4    |

|         |       |       |       |      |
|---------|-------|-------|-------|------|
| 137.475 | 9.1   | 9.4   | 1.607 | X2-1 |
| 116.157 | 8.2   | 7.95  | 1.782 | X2-2 |
| 116.787 | 5.4   | 7.2   | 3.004 | X2-3 |
| 11.752  | 1.9   | 4.3   | 1.438 | X2-4 |
| 8.929   | 1.5   | 2.85  | 2.089 | X2-5 |
| 452.912 | 5.9   | 9     | 8.529 | X3-1 |
| 243.258 | 4.9   | 5.85  | 8.486 | X3-2 |
| 154.169 | 6.9   | 6.85  | 3.262 | X3-3 |
| 106.182 | 6.2   | 8.2   | 2.089 | X4-1 |
| 108.127 | 4.8   | 7.2   | 3.129 | X4-2 |
| 20.381  | 4.15  | 2.85  | 1.723 | X4-3 |
| 7.014   | 2.183 | 2.233 | 1.438 | X4-4 |
| 141.000 | 9.33  | 9.4   | 1.607 | X5-1 |
| 352.480 | 4.9   | 7.95  | 9.048 | X5-2 |
| 121.275 | 3.85  | 7.2   | 4.375 | X5-3 |
| 32.039  | 2.95  | 5.2   | 2.089 | X5-4 |

به طور کلی نتایج FMEA نشان می دهد که ریسک ها توزیع یکنواختی ندارند؛ حدود ۳۰ درصد زیرریسک ها مسئول بیش از ۷۰ درصد شدت ریسک سیستم هستند که این موضوع با اصل پارتو نیز همخوانی دارد و خروجی FMEA تنها شدت ریسک را مشخص می کند و وابستگی میان ریسک ها را در نظر نمی گیرد؛ بنابراین استفاده از FANP در مرحله بعد ضروری است.

## ۴-۲- نتایج فرآیند تحلیل شبکه ای فازی (FANP)

اگرچه نتایج حاصل از Fuzzy FMEA توانست ریسک های اصلی و زیرریسک های بحرانی را بر اساس شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص اولویت بندی کند، اما این روش به طور ذاتی فرض می کند که تمامی ریسک ها مستقل از یکدیگر هستند. در سیستم های پیچیده نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی، این فرض با واقعیت عملیاتی سازگار نیست؛ زیرا خرابی هر زیرسیستم می تواند عملکرد سایر زیرسیستم ها را نیز تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، خرابی موتور ممکن است موجب افزایش بار وارده بر سیستم انتقال قدرت یا ایجاد ارتعاشات غیرعادی در شاسی شود و در نتیجه احتمال وقوع سایر خرابی ها را افزایش دهد.

به منظور رفع این محدودیت، در این پژوهش از فرآیند تحلیل شبکه ای فازی (FANP) استفاده شد. برخلاف روش های سلسله مراتبی، FANP قادر است وابستگی های درونی و بازخوردهای متقابل میان معیارها و زیرمعیارها را به صورت همزمان مدل سازی کند. در این چارچوب، نتایج حاصل از Fuzzy FMEA به عنوان ورودی FANP مورد استفاده قرار گرفت تا ضمن لحاظ کردن روابط متقابل میان ریسک ها، وزن واقعی هر ریسک و زیرریسک استخراج شود. این وزن ها در ادامه به عنوان ورودی روش ELECTRE III برای رتبه بندی نهایی گزینه های نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، FANP نقش واسطی میان شناسایی اولیه ریسک ها در FMEA و تصمیم گیری نهایی در ELECTRE III ایفا می کند و موجب افزایش دقت و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی می شود.

## گام ۳: تعیین وزن نسبی ریسک های اصلی

یکی از محدودیت های اساسی روش FMEA کلاسیک، فرض استقلال میان عوامل و حالت های خرابی است، در حالی که در سیستم های پیچیده نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی، خرابی یک زیرسیستم می تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر عملکرد سایر زیرسیستم ها اثرگذار باشد. به همین دلیل، پس از شناسایی و اولویت بندی اولیه ریسک ها با استفاده از Fuzzy FMEA، از فرآیند تحلیل شبکه ای فازی (FANP) برای مدل سازی وابستگی های متقابل میان ریسک ها و استخراج وزن های نسبی آن ها استفاده شد.

در این مرحله، خبرگان با استفاده از مقیاس مقایسات زوجی فازی (جدول ۳) [۷۶، ۱۱۷]. اهمیت نسبی پنج ریسک اصلی را نسبت به هدف پژوهش، یعنی انتخاب مناسب‌ترین استراتژی نگهداری و تعمیرات، ارزیابی کردند. نتایج این مقایسات در قالب ماتریس زوجی جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم Sys.1 در اغلب مقایسات زوجی نسبت به سایر سیستم‌ها دارای ارجحیت بیشتری است. این موضوع نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، خرابی‌های مرتبط با موتور بیشترین تأثیر را بر قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری تجهیزات و توقف عملیات نگهداری خطوط ریلی دارند.

در مقابل، Sys.4 پایین‌ترین میزان ارجحیت را کسب کرده است که بیانگر اثر محدودتر خرابی‌های این سیستم بر عملکرد کلی دستگاه است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اعتبار نتایج مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری است. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، مقدار نسبت ناسازگاری ( $IR=0.0321$ ) به مراتب کمتر از مقدار قابل قبول  $0.10$  است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قضاوت‌های خبرگان از سازگاری منطقی مناسبی برخوردار بوده و وزن‌های استخراج‌شده از اعتبار کافی برای ادامه تحلیل برخوردار هستند.

جدول ۱۲. ماتریس مقایسه زوجی برای ریسک‌های اصلی نسبت به هدف ( $W21$ )

Table 12. Pairwise comparison matrix for main risks in terms of the goal ( $W21$ )

| Sys. 5        | Sys. 4   | Sys. 3        | Sys. 2      | Sys. 1                 | تجهیزات سرند بالاست |
|---------------|----------|---------------|-------------|------------------------|---------------------|
| (1,2,4)       | (7,9,11) | (1,3,5)       | (1,3,5)     | (1,1,1)                | Sys. 1              |
| (1/4,1/2,1)   | (1,3,5)  | (1/5,1/3,1)   | (1,1,1)     | (1/5,1/3,1)            | Sys. 2              |
| (1,2,4)       | (5,7,9)  | (1,1,1)       | (1,3,5)     | (1/5,1/3,1)            | Sys. 3              |
| (1/7,1/5,1/3) | (1,1,1)  | (1/9,1/7,1/5) | (1/5,1/3,1) | (1/11,1/9,1/7)         | Sys. 4              |
| (1,1,1)       | (3,5,7)  | (1/4,1/2,1)   | (1,2,4)     | (1/4,1/2,1)            | Sys. 5              |
| I.R=0.0321    |          | I.I=0.0360    |             | $\lambda_{max}=5.1440$ |                     |

#### گام ۴: وزندهی زیرریسک‌ها

پس از تعیین وزن ریسک‌های اصلی، وابستگی‌های درونی میان زیرریسک‌های هر سیستم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، برای هر دسته از ریسک‌های اصلی یک ماتریس مقایسات زوجی مستقل تشکیل شد. در ادامه، وزن‌های محلی استخراج‌شده از تمامی ماتریس‌ها با استفاده از روش تحلیل گستره چانگ محاسبه شدند. سپس این وزن‌ها در قالب ابرماتریس وزن‌نشانده سازمان‌دهی گردیدند تا روابط بازخوردی و وابستگی‌های متقابل میان تمامی عناصر مدل به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود. در مرحله بعد، ابرماتریس وزن‌نشانده با استفاده از وزن خوشه‌ها به ابرماتریس وزنی تبدیل شد و نهایتاً با تکرار توان‌های متوالی در محیط MATLAB، ابرماتریس حدی استخراج گردید. این فرآیند تا رسیدن به همگرایی کامل ادامه یافت و وزن نهایی هر زیرریسک تعیین شد.

جدول ۱۳ بیانگر مقایسات زوجی زیرریسک‌های سیستم موتور (برای نمونه) است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که زیرریسک X1-4 نسبت به سایر زیرریسک‌های موتور از بیشترین اهمیت برخوردار است. علت این موضوع آن است که خرابی کمپرسور موتور مستقیماً موجب افت توان موتور، کاهش ظرفیت عملیاتی و توقف کامل فرآیند غربال‌گری بالاست می‌شود. از سوی دیگر، مقدار نسبت ناسازگاری این ماتریس برابر  $0.0814$  است که همچنان کمتر از حد مجاز ( $0.10$ ) بوده و بیانگر انسجام مناسب قضاوت‌های خبرگان است.

جدول ۱۳. ماتریس زوجی برای ریسک موتور در رابطه با چهار ریسک اصلی دیگر ( $W32$ )

Table13. Pairwise matrix for engine risk in relation with four other main risks ( $W32$ )

| X1-4          | X1-3    | X1-2        | X1-1        | Sys. 1 - ریسک اصلی      |
|---------------|---------|-------------|-------------|-------------------------|
| (1/7,1/5,1/3) | (1,3,5) | (1,2,4)     | (1,1,1)     | X1-1                    |
| (1/5,1/3,1)   | (1,2,4) | (1,1,1)     | (1/4,1/2,1) | X1-2                    |
| (1/6,1/4,1/2) | (1,1,1) | (1/4,1/2,1) | (1/5,1/3,1) | X1-3                    |
| (1,1,1)       | (2,4,6) | (1,3,5)     | (3,5,7)     | X1-4                    |
| I.R = 0.0814  |         | I.I=0.0731  |             | $\lambda_{max}= 4.2193$ |

جدول ۱۴ ساختار اولیه شبکه تصمیم را نمایش می‌دهد. در این ماتریس، تمامی وابستگی‌های متقابل میان ریسک‌های اصلی و زیرریسک‌ها لحاظ شده است؛ به گونه‌ای که هر ستون نشان‌دهنده میزان اثرگذاری یک عنصر بر سایر عناصر شبکه است. برخلاف روش سلسله‌مراتبی AHP، در FANP فرض استقلال میان معیارها حذف شده و امکان مدل‌سازی روابط بازخوردی فراهم می‌شود. این ویژگی سبب می‌شود وزن‌های نهایی با واقعیت عملکرد سیستم‌های پیچیده صنعتی تطابق بیشتری داشته باشند.

بررسی این جدول نشان می‌دهد که برخی زیرریسک‌ها علاوه بر تأثیرپذیری از ریسک اصلی خود، تحت تأثیر سایر ریسک‌های اصلی نیز قرار دارند که این موضوع اهمیت استفاده از ساختار شبکه‌ای را در مقایسه با ساختار سلسله‌مراتبی آشکار می‌کند.

جدول ۱۴. ابرماتریس وزن نشده

Table 14. Unweighted Super Matrix

|      | Goal  | S1    | S2    | S3    | S4    | S5    | S11   | S12   | S13   | S14   | S21   | S22   | S23   | S24   | S25   | S31   | S32   | S33   | S41   | S42   | S43   | S44   | S51   | S52   | S53   | S54   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Goal | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S1   | 0.242 | 0.000 | 0.132 | 0.554 | 1.000 | 0.386 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S2   | 0.171 | 0.327 | 0.000 | 0.339 | 0.000 | 0.244 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S3   | 0.215 | 0.210 | 0.478 | 0.000 | 0.000 | 0.048 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S4   | 0.174 | 0.396 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.322 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S5   | 0.197 | 0.067 | 0.390 | 0.117 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S11  | 0.000 | 0.295 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.308 | 0.300 | 0.146 | 0.112 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S12  | 0.000 | 0.204 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.154 | 0.200 | 0.073 | 0.187 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S13  | 0.000 | 0.061 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.077 | 0.100 | 0.049 | 0.140 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S14  | 0.000 | 0.441 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.462 | 0.400 | 0.732 | 0.561 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S21  | 0.000 | 0.000 | 0.383 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.632 | 0.561 | 0.533 | 0.417 | 0.412 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S22  | 0.000 | 0.000 | 0.289 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.211 | 0.187 | 0.267 | 0.333 | 0.235 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S23  | 0.000 | 0.000 | 0.214 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.105 | 0.140 | 0.133 | 0.167 | 0.176 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S24  | 0.000 | 0.000 | 0.114 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.053 | 0.112 | 0.067 | 0.083 | 0.118 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S25  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.066 | 0.061 | 0.049 | 0.043 | 0.059 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S31  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.567 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.543 | 0.541 | 0.588 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S32  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.384 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.271 | 0.270 | 0.235 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S33  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.049 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.109 | 0.135 | 0.118 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S41  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.459 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.412 | 0.439 | 0.435 | 0.490 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S42  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.339 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.235 | 0.293 | 0.261 | 0.245 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S43  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.191 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.176 | 0.146 | 0.174 | 0.122 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S44  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.013 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.118 | 0.073 | 0.087 | 0.082 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| S51  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.353 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.300 | 0.308 | 0.146 | 0.112 |
| S52  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.306 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.154 | 0.073 | 0.187 |
| S53  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.111 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.100 | 0.077 | 0.049 | 0.140 |
| S54  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.230 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.400 | 0.462 | 0.732 | 0.561 |

در جدول ۱۵، ابرماتریس وزن نشده با استفاده از وزن خوشه‌ها نرمال‌سازی شده است. این مرحله موجب می‌شود مجموع عناصر هر ستون برابر یک شود و بنابراین فرآیند همگرایی ریاضی در محاسبه ابرماتریس حدی تضمین گردد. مقایسه جداول ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهد که پس از اعمال وزن خوشه‌ها، سهم واقعی هر زیرریسک در ساختار تصمیم‌گیری مشخص شده و اثرگذاری عناصر مختلف متناسب با اهمیت نسبی آن‌ها تعدیل شده است.

جدول ۱۵. ابرماتریس وزنی

Table 15. Weighted Super Matrix

|      | Goal  | S1    | S2    | S3    | S4    | S5    | S11   | S12   | S13   | S14   | S21   | S22   | S23   | S24   | S25   | S31   | S32   | S33   | S41   | S42   | S43   | S44   | S51   | S52   | S53   | S54 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Goal | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S1   | 0.242 | 0.000 | 0.066 | 0.276 | 0.500 | 0.193 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S2   | 0.171 | 0.163 | 0.000 | 0.169 | 0.000 | 0.122 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S3   | 0.215 | 0.105 | 0.239 | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S4   | 0.174 | 0.198 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.161 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S5   | 0.197 | 0.033 | 0.195 | 0.058 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S11  | 0.000 | 0.147 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.308 | 0.300 | 0.146 | 0.112 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S12  | 0.000 | 0.102 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.154 | 0.200 | 0.073 | 0.187 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S13  | 0.000 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.077 | 0.100 | 0.049 | 0.140 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S14  | 0.000 | 0.220 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.462 | 0.400 | 0.732 | 0.561 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S21  | 0.000 | 0.000 | 0.192 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.592 | 0.529 | 0.508 | 0.400 | 0.412 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S22  | 0.000 | 0.000 | 0.145 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.198 | 0.176 | 0.255 | 0.319 | 0.235 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S23  | 0.000 | 0.000 | 0.107 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.098 | 0.132 | 0.127 | 0.160 | 0.176 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S24  | 0.000 | 0.000 | 0.057 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.050 | 0.106 | 0.064 | 0.080 | 0.118 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S25  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.062 | 0.057 | 0.047 | 0.041 | 0.059 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S31  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.282 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.588 | 0.572 | 0.625 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S32  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.191 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.294 | 0.285 | 0.250 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S33  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.118 | 0.143 | 0.125 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S41  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.229 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.438 | 0.462 | 0.455 | 0.522 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S42  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.169 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.250 | 0.308 | 0.273 | 0.261 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S43  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.096 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.187 | 0.154 | 0.182 | 0.130 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S44  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.125 | 0.077 | 0.091 | 0.087 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |     |
| S51  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.177 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.300 | 0.308 | 0.146 | 0.112 |     |
| S52  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.153 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.154 | 0.073 | 0.187 |     |
| S53  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.056 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.100 | 0.077 | 0.049 | 0.140 |     |
| S54  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.115 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.400 | 0.462 | 0.732 | 0.561 |     |

جدول ۱۶ مهم‌ترین خروجی فرآیند FANP را ارائه می‌کند. در این جدول، وزن‌های نهایی حاصل از ابرماتریس حدی با مقادیر FRPN حاصل از FMEA فازی ترکیب شده‌اند تا اهمیت نهایی هر زیرریسک محاسبه شود. نتایج نشان می‌دهد که: X3-1 با وزن نهایی 89.677 در رتبه نخست قرار گرفته است. X1-4 با وزن 62.018 دومین زیرریسک بحرانی محسوب می‌شود. X5-2 با مقدار 36.305 در رتبه سوم قرار دارد. X3-2 و X1-2 نیز به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

نکته قابل توجه این است که برخی زیرریسک‌ها علی‌رغم داشتن مقدار FRPN نسبتاً پایین، به دلیل وابستگی شدید به سایر اجزای شبکه، پس از اعمال FANP دارای وزن نهایی بالاتری شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که در سیستم‌های پیچیده نگهداری و تعمیرات، شدت ریسک به تنهایی معیار مناسبی برای تصمیم‌گیری نیست و روابط متقابل میان اجزا می‌تواند جایگاه نهایی ریسک‌ها را تغییر دهد. در مقابل، برخی زیرریسک‌ها مانند X5-4 یا X2-4 اگرچه در FMEA دارای مقدار مشخصی از FRPN بودند، اما به دلیل اثرگذاری محدود بر سایر اجزای سیستم، در رتبه‌بندی نهایی وزن نسبتاً پایینی کسب کردند. این یافته نشان می‌دهد که استفاده از FANP نسبت به روش‌های سنتی، تصویر واقع‌بینانه‌تری از اهمیت واقعی ریسک‌ها ارائه می‌کند و از تخصیص نادرست منابع نگهداری جلوگیری خواهد کرد.

جدول ۱۶. وزن‌های نهایی زیرریسک‌ها

Table 16. Final Weights of Sub-Risks

| وزن نهایی | FRPN    | (ابر ماتریس) FANP | زیرریسک          |
|-----------|---------|-------------------|------------------|
| 11.700    | 156.003 | 0.075             | X <sub>1-1</sub> |
| 26.862    | 516.573 | 0.052             | X <sub>1-2</sub> |
| 3.013     | 107.608 | 0.028             | X <sub>1-3</sub> |
| 62.018    | 255.217 | 0.243             | X <sub>1-4</sub> |
| 23.646    | 137.475 | 0.172             | X <sub>2-1</sub> |
| 13.358    | 116.157 | 0.115             | X <sub>2-2</sub> |
| 9.927     | 116.787 | 0.085             | X <sub>2-3</sub> |
| 0.529     | 11.752  | 0.045             | X <sub>2-4</sub> |
| 0.196     | 8.929   | 0.022             | X <sub>2-5</sub> |
| 89.677    | 452.912 | 0.198             | X <sub>3-1</sub> |
| 32.597    | 243.258 | 0.134             | X <sub>3-2</sub> |
| 10.483    | 154.169 | 0.068             | X <sub>3-3</sub> |
| 14.016    | 106.182 | 0.132             | X <sub>4-1</sub> |
| 10.488    | 108.127 | 0.097             | X <sub>4-2</sub> |
| 1.121     | 20.381  | 0.055             | X <sub>4-3</sub> |
| 0.028     | 7.014   | 0.004             | X <sub>4-4</sub> |
| 20.022    | 141.000 | 0.142             | X <sub>5-1</sub> |
| 36.305    | 352.480 | 0.103             | X <sub>5-2</sub> |
| 4.487     | 121.275 | 0.037             | X <sub>5-3</sub> |
| 6.728     | 32.039  | 0.210             | X <sub>5-4</sub> |

نتایج FANP نشان داد که در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل میان ریسک‌ها موجب تغییر معنادار در اولویت برخی زیرریسک‌ها نسبت به رتبه‌بندی اولیه FMEA شد. این موضوع تأیید می‌کند که تصمیم‌گیری در خصوص اولویت اقدامات نگهداری نباید صرفاً بر اساس مقدار FRPN انجام گیرد، بلکه لازم است روابط شبکه‌ای میان اجزای سیستم نیز مورد توجه قرار گیرد.

ادغام وزن‌های شبکه‌ای FANP با مقادیر FRPN، مبنای کمی مناسبی برای تشکیل ماتریس تصمیم در روش ELECTRE III فراهم کرد و امکان رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های نگهداری را بر اساس روابط برتری مهیا ساخت.

پس از استخراج وزن نهایی ریسک‌ها از طریق FANP، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های نگهداری با استفاده از روش ELECTRE III انجام شد. برخلاف روش‌های جبرانی، ELECTRE III امکان مدل‌سازی عدم قطعیت در ترجیحات تصمیم‌گیرندگان را از طریق آستانه‌های بی‌تفاوتی، ترجیح و وتو فراهم می‌کند. به همین دلیل این روش برای تصمیمات نگهداری که معمولاً با اطلاعات ناقص و قضاوت‌های انسانی همراه هستند، مناسب‌تر از روش‌های رتبه‌بندی کلاسیک است. در این پژوهش، مقادیر FRPN و وزن‌های استخراج‌شده از FANP به عنوان داده‌های ورودی ماتریس تصمیم مورد استفاده قرار گرفتند و روابط برتری میان گزینه‌های نگهداری بر اساس شاخص‌های توافق و عدم توافق محاسبه شد.

#### گام ۵: یکپارچه‌سازی نتایج Fuzzy FMEA و FANP

در این مرحله، نتایج حاصل از دو روش Fuzzy FMEA و FANP به منظور استخراج اهمیت واقعی زیرریسک‌ها با یکدیگر تلفیق شدند. در حالی که مقادیر FRPN شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص هر حالت خرابی را منعکس می‌کنند، وزن‌های حاصل از FANP اثر وابستگی‌های متقابل میان ریسک‌ها را نیز در بر می‌گیرند. بنابراین، ادغام این دو مجموعه اطلاعات موجب شد علاوه بر اهمیت ذاتی هر ریسک، نقش آن در ساختار شبکه‌ای سیستم نیز در رتبه‌بندی نهایی لحاظ شود. وزن نهایی هر زیرریسک از حاصل ضرب وزن FANP در مقدار FRPN محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱۶ ارائه گردید.

#### گام ۶: تشکیل ماتریس تصمیم ELECTRE III

به منظور رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های نگهداری، وزن‌های نهایی زیرریسک‌ها به عنوان ماتریس تصمیم وارد مدل ELECTRE III شدند. آستانه‌های بی‌تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وتو (v) بر اساس نظر خبرگان و ویژگی‌های عملیاتی تجهیزات در جدول ۱۷ تعیین شدند. یکی از مهم‌ترین مراحل اجرای روش ELECTRE III تعیین آستانه‌های بی‌تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وتو (v) است؛ زیرا این پارامترها میزان حساسیت مدل نسبت به اختلاف عملکرد گزینه‌ها را مشخص می‌کنند. در این پژوهش، تعیین این آستانه‌ها بر اساس ترکیب تحلیل داده‌های تاریخی و قضاوت خبرگان انجام شد. ابتدا داده‌های استخراج‌شده از پایگاه داده CMMS طی دوره پنج‌ساله مورد تحلیل قرار گرفت و دامنه تغییرات هر معیار ریسک بررسی گردید. سپس نتایج حاصل در اختیار خبرگان قرار گرفت تا با اتکا به تجربه عملی خود در نگهداری ماشین‌آلات سرند بالاست، حدود اختلاف قابل قبول بین گزینه‌ها را تعیین کنند.

در این چارچوب، آستانه بی‌تفاوتی (q) بیانگر اختلاف‌هایی است که از دید تصمیم‌گیرندگان فاقد اهمیت عملی بوده و عمدتاً ناشی از تغییرات طبیعی داده‌ها محسوب می‌شوند. آستانه ترجیح (p) حداقل اختلافی است که بیانگر برتری معنی‌دار یک گزینه نسبت به گزینه دیگر باشد، در حالی که آستانه وتو (v) نشان‌دهنده سطحی از اختلاف است که در صورت وقوع، ضعف شدید یک گزینه در یک معیار بحرانی، امکان جبران آن توسط سایر معیارها را از بین می‌برد. با توجه به تفاوت ماهیت پنج سیستم اصلی ماشین سرند بالاست، مقادیر q، p و v برای هر سیستم به صورت مستقل در جدول ۱۷ تعیین شد. این رویکرد موجب شد آستانه‌ها متناسب با ویژگی‌های واقعی هر سیستم تنظیم شده و مدل ELECTRE III رفتار واقعی تجهیزات را با دقت بیشتری بازنمایی کند.

جدول ۱۷. داده‌های ورودی برای اجرای ELECTRE III

Table 17. Input data for ELECTRE III application

| Sys. 5 | Sys. 4 | Sys. 3 | Sys. 2 | Sys. 1 | وزن‌های جدول ۱۳      |
|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| 0.197  | 0.174  | 0.215  | 0.171  | 0.242  |                      |
| 0      | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | (q) آستانه بی تفاوتی |
| 1      | 0.3    | 0.3    | 0.3    | 0.15   | (p) آستانه ترجیح     |
| 0.5    | 0.5    | 0.5    | 0.5    | 0.4    | (v) آستانه وتو       |

مقادیر ارائه شده در جدول فوق نشان می‌دهد که آستانه‌های تعریف شده متناسب با حساسیت عملکرد هر یک از سیستم‌های اصلی انتخاب شده‌اند. برای مثال، در سیستم موتور (Sys.1)، مقادیر پایین‌تر آستانه ترجیح و وتو بیانگر حساسیت بیشتر این سیستم نسبت به تغییرات عملکردی است؛ زیرا خرابی‌های موتور تأثیر مستقیمی بر توقف عملیات دستگاه سرند بالاست دارند. در مقابل، در برخی سیستم‌های دیگر، دامنه بزرگ‌تر آستانه‌های ترجیح و وتو بیانگر آن است که تنها اختلاف‌های قابل توجه در عملکرد می‌توانند موجب تغییر در رابطه برتری گزینه‌ها شوند. این تنظیم تطبیقی آستانه‌ها موجب افزایش واقع‌گرایی مدل و کاهش اثر نوسانات جزئی داده‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری شده است.

گام ۷: اجرای ELECTRE III و رتبه‌بندی نهایی

پس از تشکیل ماتریس تصمیم و تعیین وزن معیارها با استفاده از نتایج FMEA فازی و FANP، روش ELECTRE III به منظور استخراج رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های نگهداری اجرا گردید. در این مرحله، ابتدا شاخص‌های توافق و عدم توافق رای تمامی مقایسه‌های زوجی محاسبه شدند و سپس با در نظر گرفتن آستانه‌های بی تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وتو (v)، شاخص اعتبار برتری‌سازی برای هر زوج گزینه تعیین گردید.

برخلاف روش‌های جبرانی، ELECTRE III این امکان را فراهم می‌کند که ضعف شدید یک گزینه در یک معیار بحرانی، از طریق مکانیزم وتو مانع از انتخاب آن گردد؛ بنابراین تصمیم نهایی صرفاً بر پایه میانگین عملکرد معیارها نیست، بلکه بر اساس میزان برتری واقعی هر گزینه در مجموعه معیارهای تصمیم اتخاذ می‌شود. این ویژگی موجب شده است ELECTRE III برای مسائل تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی، که با عدم قطعیت و وابستگی متقابل معیارها همراه هستند، روش مناسبی باشد. پارامترهای q، p و v مطابق جدول ۱۷ و بر اساس نظر خبرگان حوزه تعمیرات و نگهداری تعیین شدند. انتخاب این آستانه‌ها سبب شد اختلاف‌های جزئی میان گزینه‌ها به عنوان تفاوت واقعی تلقی نشوند، در حالی که اختلاف‌های بزرگ بتوانند اثر تعیین‌کننده‌ای در روابط برتری‌سازی داشته باشند. در نتیجه، فرآیند رتبه‌بندی نسبت به نوسانات کوچک داده‌های عملیاتی از پایداری بیشتری برخوردار گردید.

جدول ۱۸ ماتریس اعتبار برتری‌سازی و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار هر درایه بیانگر میزان اطمینان مدل نسبت به برتری یک گزینه بر گزینه دیگر است. هرچه مقدار شاخص اعتبار به عدد یک نزدیک‌تر باشد، شواهد بیشتری برای برتری آن گزینه وجود دارد. مطابق نتایج جدول ۱۸، گزینه A1 با کسب بیشترین میزان اعتبار نسبت به سایر گزینه‌ها، در رتبه نخست قرار گرفت. مقدار اعتبار برابر با 1 در مقایسه A1 با گزینه‌های A4 و A5 نشان می‌دهد که هیچ معیار وتویی مانع برتری این گزینه نشده و تمامی معیارهای اصلی از انتخاب آن

حمایت می‌کنند. همچنین مقدار 0.9453 در مقایسه A1 با A3 بیانگر وجود برتری قوی این گزینه حتی در شرایطی است که اختلاف عملکرد دو گزینه نسبتاً محدودتر بوده است.

گزینه A2 نیز با حفظ روابط برتری نسبت به سه گزینه دیگر، در رتبه دوم قرار گرفت. اگرچه اختلاف آن با A1 اندک است، اما شاخص‌های اعتبار پایین‌تر در مقایسه مستقیم با A1 مانع از قرارگیری آن در رتبه نخست شده است. در مقابل، گزینه‌های A4 و A5 کمترین میزان روابط برتری را نشان دادند. به‌ویژه گزینه A5 در هیچ مقایسه‌ای موفق به کسب برتری معنادار نسبت به سایر گزینه‌ها نشد که این موضوع بیانگر عملکرد ضعیف آن در معیارهای بحرانی است. نکته قابل توجه آن است که ساختار ماتریس اعتبار فاقد چرخه‌های تصمیم‌گیری و ناسازگاری منطقی است؛ بنابراین، رتبه‌بندی نهایی از انسجام مناسبی برخوردار بوده و نتایج حاصل قابلیت اتکا برای تصمیم‌گیری مدیریتی را دارند.

بر اساس این نتایج، استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) به‌عنوان مناسب‌ترین سیاست نگهداری برای دستگاه سرند بالاست انتخاب شد. این نتیجه با رتبه‌بندی ریسک‌های حاصل از FMEA فازی و وزن‌های استخراج‌شده توسط FANP نیز همخوانی دارد و بیانگر سازگاری میان سه مرحله اصلی چارچوب پیشنهادی است.

جدول ۱۸. ماتریس اعتبار برتری‌سازی و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

Table 18. Outranking Credibility matrix & final ranking of alternatives

| جایگاه رتبه بندی | A5 | A4 | A3     | A2     | A1     |    |
|------------------|----|----|--------|--------|--------|----|
| 1st              | 1  | 1  | 0.9453 | 0.6873 | -      | A1 |
| 2nd              | 1  | 1  | 0.8680 | -      | 0.6697 | A2 |
| 3rd              | 1  | 1  | -      | 0      | 0      | A3 |
| 4th              | 1  | -  | 0.1055 | 0      | 0      | A4 |
| 5th              | -  | 0  | 0      | 0      | 0      | A5 |

#### ۴-۴- تحلیل حساسیت و پایداری نتایج

از آنجا که نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است تحت تأثیر تغییرات وزن معیارها، قضاوت خبرگان و پارامترهای مدل قرار گیرند، ارزیابی پایداری (Stability) و استحکام (Robustness) چارچوب پیشنهادی، یکی از الزامات اساسی اعتبارسنجی مدل‌های تصمیم‌گیری محسوب می‌شود. در این راستا، بسیاری از مطالعات اخیر در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره، انجام تحلیل حساسیت را به عنوان ابزاری برای بررسی قابلیت اعتماد نتایج و کاهش ریسک ناشی از عدم قطعیت در قضاوت‌های خبرگان توصیه کرده‌اند.

اگرچه در مرحله Fuzzy FMEA عدم قطعیت ناشی از ارزیابی‌های انسانی از طریق اعداد فازی مدل‌سازی گردید و در مرحله FANP نیز وابستگی و بازخورد میان معیارها لحاظ شد، اما همچنان این پرسش مطرح است که آیا تغییرات منطقی در وزن معیارها یا پارامترهای ELECTRE III می‌تواند منجر به تغییر در رتبه‌بندی نهایی گزینه‌های نگهداری شود یا خیر. پاسخ به این پرسش برای تصمیم‌گیرندگان صنعت ریلی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا در شرایط واقعی، تغییر شرایط عملیاتی، تفاوت دیدگاه خبرگان یا تغییر اولویت‌های سازمانی می‌تواند بر وزن معیارها و پارامترهای تصمیم اثرگذار باشد.

بر همین اساس، به منظور ارزیابی میزان پایداری نتایج و بررسی استحکام چارچوب یکپارچه-Fuzzy FMEA-FANP-ELECTRE III، تحلیل حساسیت بر روی مهم‌ترین پارامترهای مدل انجام شد. در این تحلیل، ابتدا وزن‌های معیارهای اصلی حاصل از FANP به صورت سیستماتیک در سناریوهای مختلف با تغییرات  $\pm 10\%$  درصد،  $\pm 20\%$  درصد و  $\pm 30\%$  درصد تعدیل شدند. علاوه بر این، به منظور بررسی میزان حساسیت روش ELECTRE III نسبت به پارامترهای تصمیم، مقادیر آستانه‌های بی‌تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وتو (v) نیز در بازه‌های منطقی تغییر داده شدند و فرآیند رتبه‌بندی در تمامی سناریوها مجدداً اجرا گردید.

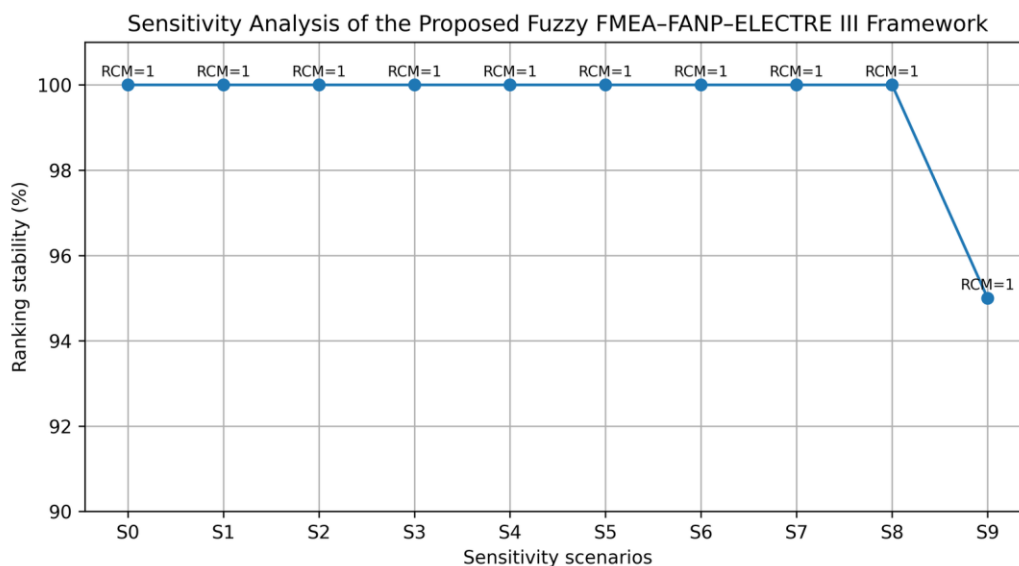
در هر سناریو، تغییرات شاخص اعتبار، ترتیب برتری گزینه‌ها و رتبه نهایی سیاست‌های نگهداری مورد بررسی قرار گرفت. سپس نتایج حاصل با رتبه‌بندی اولیه مقایسه شد تا مشخص گردد کدام معیارها بیشترین تأثیر را بر تصمیم نهایی دارند و آیا گزینه منتخب در برابر تغییرات معقول پارامترها همچنان پایدار باقی می‌ماند یا خیر. نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۱۹ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی از پایداری تصمیم‌گیری بالایی برخوردار است؛ به گونه‌ای که در تمامی سناریوهای بررسی شده، استراتژی نگهداری تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) جایگاه نخست خود را حفظ کرده است. همچنین مشاهده شد که بیشترین حساسیت مدل مربوط به تغییر وزن معیارهای مرتبط با سیستم موتور (Sys.1) و شاسی بدنه (Sys.3) است، در حالی که تغییر وزن سایر معیارها تنها موجب جابه‌جایی محدود میان گزینه‌های میانی شده و تأثیری بر گزینه برتر نداشته است. این یافته‌ها بیانگر آن است که تصمیم نهایی حاصل از چارچوب پیشنهادی، وابسته به یک مجموعه خاص از وزن‌ها یا قضاوت‌های خبرگان نبوده و از استحکام و قابلیت اعتماد مناسبی برای کاربرد در محیط‌های واقعی نگهداری و تعمیرات برخوردار است.

جدول ۱۹. نتایج تحلیل حساسیت چارچوب پیشنهادی

Table 19. Outranking Credibility matrix & final ranking of alternatives

| سناریو | تغییر اعمال شده              | رتبه اول | تغییر رتبه‌ها                |
|--------|------------------------------|----------|------------------------------|
| S0     | حالت پایه                    | A1       | بدون تغییر                   |
| S1     | Sys.1 افزایش ۱۰٪ وزن         | A1       | بدون تغییر                   |
| S2     | Sys.1 کاهش ۱۰٪ وزن           | A1       | بدون تغییر                   |
| S3     | Sys.3 افزایش ۲۰٪ وزن         | A1       | بدون تغییر                   |
| S4     | Sys.3 کاهش ۲۰٪ وزن           | A1       | بدون تغییر                   |
| S5     | Sys.5 افزایش ۲۰٪ وزن         | A1       | بدون تغییر                   |
| S6     | Sys.5 کاهش ۲۰٪ وزن           | A1       | بدون تغییر                   |
| S7     | تغییر همزمان ۱۰٪ همه معیارها | A1       | بدون تغییر                   |
| S8     | تغییر همزمان ۲۰٪ همه معیارها | A1       | بدون تغییر                   |
| S9     | تغییر همزمان ۳۰٪ همه معیارها | A1       | A5 و A4 جابجایی جزئی فقط بین |

در مجموع، تحلیل حساسیت تأیید می‌کند که چارچوب پیشنهادی نه تنها از نظر دقت رتبه‌بندی، بلکه از نظر پایداری تصمیم‌گیری نیز عملکرد مناسبی داشته و قابلیت استفاده در محیط‌های واقعی نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی را داراست. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، رتبه گزینه برتر (A1) RCM در تمامی سناریوهای تحلیل حساسیت ثابت باقی مانده است. حتی با اعمال تغییرات هم‌زمان تا  $\pm 30\%$  درصد در وزن معیارها، تنها جابه‌جایی محدودی بین گزینه‌های با اولویت پایین‌تر (A5 و A4) مشاهده شد، در حالی که گزینه برتر و گزینه‌های اصلی هیچ تغییری در رتبه خود نداشتند. این موضوع بیانگر استحکام، پایداری و قابلیت اعتماد چارچوب پیشنهادی در برابر تغییرات منطقی پارامترهای تصمیم‌گیری است.



شکل ۴- تحلیل حساسیت و پایداری رتبه‌بندی چارچوب پیشنهادی در سناریوهای مختلف تغییر وزن معیارها

Figure 4. Sensitivity analysis and ranking stability of the proposed Fuzzy FMEA-FANP-ELECTRE III framework under different weighting scenarios

#### ۴-۵- اعتبارسنجی مدل

به منظور ارزیابی اعتبار، قابلیت اعتماد و استحکام چارچوب پیشنهادی، اعتبارسنجی مدل از سه منظر مکمل شامل اعتبار تجربی، تحلیل حساسیت و مقایسه با مطالعات پیشین انجام شد. نخست، اعتبار تجربی مدل از طریق پیاده‌سازی آن بر روی یک مطالعه موردی واقعی در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران بررسی گردید. برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که صرفاً بر قضاوت خبرگان یا داده‌های فرضی متکی بوده‌اند، در این پژوهش از داده‌های واقعی پنج ساله استخراج شده از سامانه مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) شامل سوابق خرابی، فعالیت‌های تعمیراتی، گزارش‌های توقف تجهیزات و اطلاعات عملکردی دستگاه‌ها سرند بالاست استفاده شد. نتایج حاصل از Fuzzy FMEA و فرآیند تصمیم‌گیری نشان داد که ریسک‌های شناسایی شده با تجربیات خبرگان و سوابق واقعی خرابی تجهیزات انطباق مناسبی دارند.

در گام بعد، به منظور بررسی پایداری تصمیمات، تحلیل حساسیت بر روی وزن معیارهای اصلی حاصل از FANP و همچنین آستانه‌های بی‌تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وِش (v) در روش ELECTRE III انجام شد. نتایج نشان داد که اگرچه تغییرات منطقی در وزن معیارها موجب جابه‌جایی محدود برخی گزینه‌های میانی گردید، اما استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) در تمامی سناریوهای بررسی شده جایگاه نخست خود را حفظ نمود. این یافته بیانگر استحکام، پایداری و قابلیت اعتماد چارچوب پیشنهادی در برابر تغییرات معقول پارامترهای تصمیم است.

در نهایت، اعتبار بیرونی مدل از طریق مقایسه نتایج با مطالعات پیشین مورد ارزیابی قرار گرفت. این مقایسه نشان داد که اگرچه پژوهش‌های پیشین نیز خرابی‌های مرتبط با موتور، شاسی و سیستم انتقال قدرت را از مهم‌ترین عوامل کاهش قابلیت اطمینان تجهیزات ریلی معرفی کرده‌اند، اما اغلب آن‌ها وابستگی متقابل میان معیارها را مدل‌سازی نکرده و از روش‌های سلسله‌مراتبی یا جبرانی استفاده کرده‌اند. در مقابل، چارچوب پیشنهادی با تلفیق Fuzzy

FMEA، FANP و ELECTRE III ضمن مدیریت هم‌زمان عدم قطعیت، وابستگی میان معیارها و روابط برتری، امکان رتبه‌بندی واقع‌بینانه‌تر گزینه‌های نگهداری را فراهم ساخت. همچنین هم‌راستایی زیرریسک‌های بحرانی شناسایی شده با نتایج مطالعات معتبر پیشین، مؤید اعتبار عملی و قابلیت کاربرد این چارچوب در تصمیم‌گیری‌های نگهداری و تعمیرات تجهیزات سرمایه‌بر است.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که چارچوب پیشنهادی نه تنها از نظر محاسباتی معتبر است، بلکه از منظر تجربی، پایداری تصمیم‌گیری و انطباق با شواهد موجود نیز از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مؤثر در انتخاب استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات تجهیزات ریلی مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۴-۶- بحث و پیامدهای عملی

نتایج حاصل از چارچوب یکپارچه Fuzzy FMEA-FANP-ELECTRE III نشان داد که استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) با بالاترین شاخص اعتبار مناسب‌ترین سیاست نگهداری برای دستگاه سرنده بالاست مورد مطالعه است. برخلاف رویکردهای متداول که انتخاب استراتژی نگهداری را صرفاً بر اساس شدت خرابی یا نرخ وقوع انجام می‌دهند، چارچوب پیشنهادی این پژوهش علاوه بر در نظر گرفتن شدت، وقوع و قابلیت تشخیص خرابی‌ها، وابستگی‌های متقابل میان ریسک‌ها و عدم قطعیت موجود در قضاوت خبرگان را نیز لحاظ کرده است. در نتیجه، رتبه‌بندی نهایی بازتاب دقیق‌تری از رفتار واقعی سیستم ارائه می‌دهد.

نتایج Fuzzy FMEA نشان داد که سیستم‌های موتور (Sys.1)، شاسی بدنه (Sys.3) و سیستم انتقال قدرت (Sys.5) دارای بیشترین مقادیر FRPN هستند. این یافته بیانگر آن است که خرابی این زیرسیستم‌ها علاوه بر فراوانی وقوع، پیامدهای عملکردی و اقتصادی قابل توجهی بر قابلیت دسترسی تجهیزات دارند. به‌ویژه زیرریسک‌های X3-1 زنجیر شاسی بدنه، X1-4 کمپرسور موتور و X5-2 دیفرانسیل سیستم انتقال قدرت بالاترین مقادیر وزن نهایی را کسب کردند که نشان‌دهنده نقش کلیدی آنها در کاهش قابلیت اطمینان ماشین‌آلات نگهداری خطوط ریلی است.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، تأثیر قابل توجه فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی (FANP) بر نتایج نهایی است. در صورتی که تنها از مقادیر FRPN استفاده می‌شد، اولویت‌بندی صرفاً بر اساس شدت ریسک انجام می‌گرفت؛ در حالی که FANP نشان داد برخی زیرریسک‌ها، علی‌رغم داشتن FRPN پایین‌تر، به دلیل اثرگذاری متقابل بر سایر اجزای سیستم، اهمیت راهبردی بیشتری دارند. به عبارت دیگر، FANP وابستگی‌های میان اجزای سیستم را که در روش‌های سلسله‌مراتبی مانند AHP قابل مدل‌سازی نیست، در فرآیند تصمیم‌گیری وارد کرده و موجب اصلاح رتبه‌بندی اولیه ریسک‌ها شده است. از سوی دیگر، استفاده از روش ELECTRE III موجب شد تصمیم نهایی تنها بر اساس مقایسه مستقیم وزن‌ها اتخاذ نشود، بلکه عدم قطعیت موجود در تصمیم‌گیری از طریق آستانه‌های بی‌تفاوتی (q)، ترجیح (p) و وتو (v) نیز لحاظ گردد. این ویژگی باعث شد گزینه‌هایی که اختلاف ناچیزی در عملکرد دارند، به‌صورت واقع‌بینانه ارزیابی شوند و از انتخاب‌های مبتنی بر اختلافات جزئی جلوگیری شود. بر همین اساس، برتری RCM نسبت به سایر گزینه‌ها صرفاً ناشی از کسب بیشترین وزن نبود، بلکه حاصل عملکرد پایدار این استراتژی در تمامی معیارهای اصلی و روابط برتری میان گزینه‌ها بود.

تحلیل ماتریس اعتبار نیز این موضوع را تأیید می‌کند. مقدار اعتبار 0.6873 برای برتری RCM نسبت به PdM نشان می‌دهد که حتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تصمیم، RCM در اکثر معیارها بر PdM غلبه دارد. همچنین مقادیر 0.9453 و 1.000 در مقایسه RCM با سایر گزینه‌ها بیانگر آن است که اختلاف عملکرد میان این گزینه‌ها به اندازه‌ای است که از آستانه ترجیح عبور کرده و برتری RCM از نظر مدل ELECTRE III تقریباً قطعی ارزیابی می‌شود. بنابراین، انتخاب RCM تنها نتیجه وزن‌دهی معیارها نیست، بلکه حاصل ترکیب همزمان روابط برتری، وابستگی معیارها و مدیریت عدم قطعیت است.

نتایج تحلیل حساسیت نیز استحکام چارچوب پیشنهادی را تأیید نمود. با وجود تغییر وزن معیارهای اصلی و همچنین تغییر آستانه‌های تصمیم‌گیری ELECTRE III در سناریوهای مختلف، استراتژی RCM در تمامی حالات رتبه نخست خود را حفظ کرد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده نسبت به تغییرات منطقی در قضاوت خبرگان و شرایط تصمیم‌گیری حساسیت کمی داشته و از پایداری مناسبی برخوردار است. همچنین مشخص شد که معیارهای مرتبط با سیستم موتور و شاسی بدنه بیشترین تأثیر را بر نتایج نهایی دارند، در حالی که تغییر وزن سایر سیستم‌ها تنها موجب جابه‌جایی محدود میان گزینه‌های میانی گردید.

نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین در حوزه انتخاب استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات همخوانی قابل قبولی دارد. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که استفاده از FMEA فازی موجب کاهش عدم قطعیت در ارزیابی ریسک و بهبود دقت اولویت‌بندی خرابی‌ها می‌شود. همچنین تحقیقات مبتنی بر ANP بیان کرده‌اند که در مسائل پیچیده نگهداری، وجود وابستگی میان معیارها می‌تواند رتبه‌بندی نهایی را نسبت به روش‌های سلسله‌مراتبی متداول تغییر دهد. یافته‌های این پژوهش نیز این نتایج را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد لحاظ نمودن وابستگی میان ریسک‌ها، باعث تغییر اولویت برخی زیرریسک‌ها و ارائه تصویری واقع‌بینانه‌تر از وضعیت سیستم شده است.

از سوی دیگر، در بسیاری از مطالعات پیشین، روش‌هایی نظیر FMEA-AHP-TOPSIS یا FMEA-AHP-VIKOR برای انتخاب استراتژی نگهداری به کار گرفته شده‌اند. اگرچه این روش‌ها در رتبه‌بندی گزینه‌ها عملکرد مناسبی دارند، اما معمولاً وابستگی میان معیارها را نادیده گرفته و روابط برتری را تنها بر اساس فاصله از گزینه ایده‌آل ارزیابی می‌کنند. در مقابل، چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش با ترکیب Fuzzy FMEA، FANP و ELECTRE III علاوه بر مدل‌سازی عدم قطعیت، وابستگی‌های متقابل میان ریسک‌ها و مفهوم برتری را نیز در فرآیند تصمیم‌گیری وارد کرده است؛ از این‌رو انتظار می‌رود نتایج حاصل، در محیط‌های واقعی که با پیچیدگی و عدم قطعیت همراه هستند، از قابلیت اتکای بیشتری برخوردار باشند.

از منظر مدیریتی، نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران نگهداری و تعمیرات کمک کند تا منابع محدود مالی، نیروی انسانی و قطعات یدکی را بر روی زیرسیستم‌هایی متمرکز کنند که بیشترین تأثیر را بر قابلیت اطمینان تجهیزات دارند. تمرکز بر زیرریسک‌های اولویت‌دار، به‌ویژه در سیستم‌های موتور، شاسی و انتقال قدرت، می‌تواند موجب افزایش MTBF، کاهش MTTR، کاهش توقفات اضطراری، بهبود دسترسی پذیرش تجهیزات و کاهش هزینه‌های چرخه عمر دارایی‌ها شود.

در سطح کلان نیز چارچوب پیشنهادی قابلیت تعمیم به سایر ماشین‌آلات مکانیزه نگهداری خطوط، ناوگان ریلی و حتی صنایع سرمایه‌بر نظیر نفت، گاز، معدن و نیروگاه‌ها را دارد. استفاده از این چارچوب می‌تواند

مبنایی برای استقرار نظام‌های تصمیم‌یار هوشمند در مدیریت دارایی‌های فیزیکی، تدوین برنامه‌های نگهداری مبتنی بر ریسک و حرکت به سمت نگهداری هوشمند در صنعت ریلی کشور باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه مبتنی بر Fuzzy FMEA-FANP-ELECTRE III برای اولویت‌بندی ریسک‌ها و انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات تجهیزات بحرانی راه‌آهن ارائه کرد. اعتبار چارچوب پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی بر روی دستگاه سرنند بالاست راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران و با استفاده از داده‌های واقعی پنج‌ساله استخراج‌شده از سامانه مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (CMMS) ارزیابی شد.

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق سه روش مکمل است؛ به‌گونه‌ای که Fuzzy FMEA عدم قطعیت موجود در ارزیابی خبرگان را مدیریت می‌کند، FANP وابستگی‌ها و بازخوردهای متقابل میان معیارها و زیرریسک‌ها را در محاسبه اوزان لحاظ می‌نماید و ELECTRE III با بهره‌گیری از روابط برتری‌سازی و آستانه‌های تصمیم، امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها را در شرایط تعارض معیارها و عدم قطعیت فراهم می‌سازد. این ترکیب، محدودیت‌های روش‌های متداول مبتنی بر رتبه‌بندی مستقل یا ساختارهای صرفاً سلسله‌مراتبی را برطرف کرده و چارچوبی واقع‌بینانه‌تر برای تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات ارائه می‌دهد.

نتایج نشان داد که استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) بهترین گزینه برای تجهیز مورد مطالعه است. همچنین زیرریسک‌های X3-1، X1-4، X5-2، X3-2، X1-2 و X2-1 به‌عنوان بحرانی‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم شناسایی شدند. این یافته‌ها بیانگر آن است که تمرکز برنامه‌های نگهداری بر تعداد محدودی از اجزای بحرانی می‌تواند قابلیت اطمینان تجهیزات را افزایش داده، توقفات ناخواسته را کاهش دهد و شاخص‌هایی نظیر MTBF و MTTR را بهبود بخشد.

به‌منظور ارزیابی اعتبار و استحکام چارچوب پیشنهادی، تحلیل حساسیت نیز انجام شد. نتایج نشان داد که با وجود تغییرات منطقی در وزن معیارهای FANP و آستانه‌های تصمیم‌گیری ELECTRE III، رتبه نخست RCM در تمامی سناریوها حفظ شد و تنها جابه‌جایی‌های محدودی در گزینه‌های میانی مشاهده گردید. این موضوع بیانگر پایداری، استحکام و قابلیت اعتماد بالای مدل پیشنهادی در برابر تغییرات معقول پارامترهای تصمیم است.

از منظر کاربردی، چارچوب ارائه‌شده می‌تواند به مدیران نگهداری و تعمیرات در اولویت‌بندی تخصیص منابع، استقرار نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان، توسعه سامانه‌های پایش وضعیت، بهینه‌سازی موجودی قطعات یدکی، برنامه‌ریزی بازرسی‌های مبتنی بر ریسک، یکپارچه‌سازی با سامانه CMMS و تصمیم‌گیری راهبردی برای نوسازی تجهیزات و تخصیص بودجه کمک کند. بدین ترتیب، نتایج این پژوهش می‌تواند علاوه بر ارتقای عملکرد نگهداری تجهیزات بحرانی، در تدوین سیاست‌های کلان مدیریت دارایی‌های فیزیکی و افزایش بهره‌وری صنعت ریلی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

با وجود مزایای چارچوب پیشنهادی، نتایج پژوهش باید با در نظر گرفتن برخی محدودیت‌ها تفسیر شود. مطالعه حاضر بر یک تجهیز بحرانی متمرکز بوده و اگرچه ساختار مدل قابلیت تعمیم دارد، اما اوزان معیارها و روابط میان ریسک‌ها در سایر تجهیزات یا صنایع نیازمند کالیبراسیون مجدد است. همچنین بخشی از فرآیند تصمیم‌گیری بر

قضاوت ۲۰ نفر خبره با میانگین ۱۷ سال سابقه تخصصی استوار بوده است؛ هرچند برای افزایش اعتبار نتایج از روش دلفی، آزمون سازگاری و تحلیل حساسیت استفاده شد.

در پژوهش‌های آینده، توسعه چارچوب حاضر با بهره‌گیری از رویکردهای پیشرفته مدیریت عدم قطعیت نظیر  $Z$ -Pythagorean Fuzzy، Hesitant Fuzzy، number، Interval Type-2 Fuzzy، تلفیق آن با فناوری‌های یادگیری ماشین، اینترنت اشیا صنعتی (IIoT)، نگهداری پیشگویانه (Predictive Maintenance) و دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) و همچنین ارزیابی عملکرد مدل در سایر تجهیزات ریلی و صنایع مختلف پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، مقایسه تجربی این چارچوب با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به توسعه مدل‌های دقیق‌تر، پایدارتر و کاربردی‌تر در مدیریت ریسک و نگهداری و تعمیرات منجر شود.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که چارچوب یکپارچه Fuzzy FMEA-FANP-ELECTRE III ابزاری علمی، پایدار و کاربردی برای مدیریت ریسک و انتخاب استراتژی‌های نگهداری در سیستم‌های پیچیده صنعتی است و می‌تواند به‌عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم برای بهبود قابلیت اطمینان، افزایش بهره‌وری و ارتقای سیاست‌گذاری نگهداری در صنعت ریلی و سایر صنایع سرمایه‌بر مورد استفاده قرار گیرد.

## REFERENCES

- [1] British Standards Institution (2017). BS EN 13306: Maintenance
- [2] Madu, C. N. (2000). Competing through maintenance strategies. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(9), 937-948. DOI: <https://doi.org/10.1108/02656710010378752>
- [3] Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
- [4] Tan, M. T., & Raghavan, N. (2007). Root cause analysis-based maintenance policy. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24(2), 203-228.
- [5] Lu, K. Y., & Sy, C. C. (2009). A real-time decision-making of maintenance using fuzzy agent. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 2691-2698.
- [6] Özcan, E. Ç., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410-1423. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.039>
- [7] Karabağ, O., Eruguz, A. S., & Basten, R. (2020). Integrated optimization of maintenance interventions and spare part selection for a partially observable multi-component system. *Reliability Engineering and System Safety*, 200, 106955. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106955>
- [8] Badía, F. G., Berrade, M. D., & Lee, H. (2020). A study of cost-effective maintenance policies: Age replacement versus replacement after N minimal repairs. *Reliability Engineering and System Safety*, 201, 106949. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106949>
- [9] Leoni, L., Bahoo Toroodi, A., De Carlo, F., & Paltrinieri, N. (2019). Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 57, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.003>
- [10] Ali-Marttila, M. (2013). Profiling the value of industrial maintenance services. Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. Available at: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201309105669>
- [11] Gulati, R. (2012). Maintenance and reliability best practices. Industrial Press, Inc.
- [12] Jain, A., Bhatti, R., & Singh, H. (2014). Total productive maintenance (TPM) implementation practice: A literature review and directions. *International Journal of Lean Six Sigma*. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2013-0032>
- [13] Chen, J., Zhang, R., & Di, W. (2018). Equipment maintenance business model innovation for sustainable competitive advantage in the digitalization context: Connotation, types, and measuring. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10113970>
- [14] CEN (2010). BS EN 13306: Maintenance - Maintenance terminology.
- [15] Ben-Daya, M., Kumar, U., & Murthy, D. N. P. (2016). Introduction to maintenance engineering: modelling, optimization and management. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [16] Golbasi, O., & Turan, M. O. (2020). A discrete-event simulation algorithm for the optimization of multi-scenario maintenance policies. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106514. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106514>
- [17] Selcuk, S. (2017). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1670-1679. <https://doi.org/10.1177/0954405415601640>
- [18] He, S., Song, L., Li, T., Zhao, X., & Liu, B. (2022). A finite-time maintenance policy of deteriorating systems with multiple dependent performance characteristics. *Journal of Management Science and Engineering*, 7(3), 439-452. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.12.003>
- [19] Sakib, N., & Wuest, T. (2018). Challenges and opportunities of condition-based predictive maintenance: A review. *Procedia CIRP*, 78, 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.318>

- [Y0] Cachada, A., Barbosa, J., Leitão, P., et al. (2018). Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture. *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Turin, 4-7 September 2018, 39-146. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502489>
- [Y1] Jasiulewicz-Kaczmarek, M., & Gola, A. (2019). *Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing* - an overview. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.005>
- [Y2] Al-Turki, U. M., Ayar, T., Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2014). *Maintenance in manufacturing environment: An overview*. In Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 5-23. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06290-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06290-7_2)
- [Y3] Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An evolutionary perspective. In *Complex System Maintenance Handbook*, pp. 21-48.
- [Y4] Roy, R., Stark, R., Tracht, K., Takata, S., & Mori, M. (2016). Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 667-688. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.006>
- [Y5] Sahu, A. R., & Palei, S. K. (2020). Fault prediction of drag system using artificial neural network for prevention of dragline failure. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104542.
- [Y6] Laggoune, R., Chateaneuf, A., & Aissani, D. (2009). Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering*, 33(9), 1499-1510.
- [Y7] Shafiee, M., & Dalsgaard Sørensen, J. (2019). Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies. *Reliability Engineering & System Safety*, 192, 105993. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.10.025>
- [Y8] Ding, S. H., Kamaruddin, S., & Azid, I. A. (2014a). Maintenance policy selection model – A case study in the palm oil industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(3), 415-435. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2012-0032>
- [Y9] Vinodh, S., & Varadharajan, A. R. (2013). Application of fuzzy VIKOR for concept selection in agile environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 825-832. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4220-2>
- [Y0] Karaarslan, N., & Gundogar, E. (2009). An application for modular capability-based ERP software selection using AHP method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 1025-1033. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1522-5>
- [Y1] Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- [Y2] Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365-381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- [Y3] Bevilacqua, B., & Braglia, M. (2000). The analytic process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71-83. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8)
- [Y4] Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming-AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(7), 839-848. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.08.006>
- [Y5] Dey, P. K. (2004). Decision support system for inspection and maintenance: a case study of oil pipelines. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 51(1), 47-56. <https://doi.org/10.1109/TEM.2003.822464>
- [Y6] Yousefpoor, N., & Fazlollahtabar, H. (2008). Selection of optimum maintenance strategies in a virtual learning environment based on analytic hierarchy process. *Virtual Learning International Conference Proceeding*, Constanța, pp. 143-152.
- [Y7] Ratnayake, R. M. C., & Markeset, T. (2010). Technical integrity management: measuring HSE awareness using AHP in selecting a maintenance strategy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 16(1), 44-63. <https://doi.org/10.1108/13552511011030327>

- [٣٨] Muinde, P. M., Muchiri, P. N., & Ikua, B. W. (2020). Maintenance Strategy Selection using Analytic Hierarchy Process: A case study. *Journal of Sustainable Research in Engineering*, 1(4), 21-29.
- [٣٩] Vishnu, C. R., & Regikumar, V. (2016). Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study. *Procedia Technology*, 25, 1080-1087. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.211>
- [٤٠] Mishra, S. K., Mahapatra, D. K., & Chandrahas (2015). Maintenance Strategy and Decision Making - AHP Method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 4(2), 256-258.
- [٤١] Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., & He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk-based inspection. *Safety Science*, 49(6), 852-860. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.01.015>
- [٤٢] Karthik, S., Manimaran, A., Sekar, S., & Silksan, J. (2017). Optimizing maintenance strategy using simulation based AHP. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8, 104-111.
- [٤٣] Shyjith, K., Ilangkumaran, M., & Kumanan, S. (2008). Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 375-386. <https://doi.org/10.1108/13552510810909975>
- [٤٤] Ding, S. H., Kamaruddin, S., & Azid, I. A. (2014b). Development of a model for optimal maintenance policy selection. *European Journal of Industrial Engineering*, 8(1), 50-68. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2014.059349>
- [٤٥] Cai, M., Meng, Q., Han, X., Li, Q., & Bao, Ch. (2025). Risk response decision model using risk scenario decomposition for large-scale problems. *Journal of Management Science and Engineering*, 10(4), 534-565. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2025.08.002>
- [٤٦] Azadeh, A., & Zadeh, S. A. (2016). An integrated fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy multiple-criteria decision-making simulation approach for maintenance policy selection. *Simulation*, 92(1), 3-18. <https://doi.org/10.1177/0037549715616686>
- [٤٧] Nezami, F. G., & Yildirim, M. B. (2013). A sustainability approach for selecting maintenance strategy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(4), 332-343. <https://doi.org/10.1080/19397038.2013.765928>
- [٤٨] Wang, L., Chu, J., & Wu, J. (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.08.005>
- [٤٩] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [٥٠] Sharma, R. K., Kumar, D., & Kumar, P. (2005). FLM to select suitable maintenance strategy in process industries using MISO model. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11(4), 359-374. <https://doi.org/10.1108/13552510510626981>
- [٥١] Ding, J. F., & Liang, G. S. (2005). Using fuzzy MCDM to select partners of strategic alliances for liner shipping. *Information Sciences*, 173(1), 197-225. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2004.07.013>
- [٥٢] Labib, A. (2004). A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 10(3), 191-202. [DOI:10.1108/13552510410553244](https://doi.org/10.1108/13552510410553244)
- [٥٣] Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2010). Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. *Safety Science*, 48(2), 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.09.005>
- [٥٤] Ghosh, D., & Roy, S. (2010). A decision-making framework for process plant maintenance. *European Journal of Industrial Engineering*, 4(1), 78-98. [DOI: 10.1504/EJIE.2010.029571](https://doi.org/10.1504/EJIE.2010.029571)
- [٥٥] Pariazar, M., Shahrabi, J., Zaeri, M. S., & Parhizi, S. (2008). A combined approach for maintenance strategy selection. *Journal of Applied Sciences*, 8(23), 4321-4329. [DOI: 10.3923/jas.2008.4321.4329](https://doi.org/10.3923/jas.2008.4321.4329)
- [٥٦] Ilangkumaran, M., & Kumanan, S. (2009). Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision-making approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(7), 1009-1022. [DOI: 10.1108/17410380910984258](https://doi.org/10.1108/17410380910984258)
- [٥٧] Ahmadi, A., Gupta, S., Karim, R., & Kumar, U. (2010). Selection of maintenance strategy for aircraft systems using multi-criteria decision-making methodologies. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 17(03), 223-243. <https://doi.org/10.1142/S0218539310003779>

- [٥٨] Chen, F.-L., & Chen, Y.-C. (2010). Evaluating the maintenance performance of the semiconductor factories based on the analytical hierarchy process and grey relational analysis. *American Journal of Applied Sciences*, 7(4), 568-574. DOI: [10.3844/ajassp.2010.568.574](https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.568.574)
- [٥٩] Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., Lashgari, A., Zavadskas, E. K., & Turkis, Z. (2012). Maintenance strategy selection using AHP and COPRAS under fuzzy environment. *International Journal of Strategic Property Management*, 16(1), 85-104. DOI: [10.3846/1648715X.2012.666657](https://doi.org/10.3846/1648715X.2012.666657)
- [٦٠] Chan, F. T. S., & Prakash, A. (2012). Maintenance policy selection in manufacturing firms using the fuzzy MCDM approach. *International Journal of Production Research*, 50(23), 7044-7056. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.653451>
- [٦١] Al-Najjar, B., & Alsyouf, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decisions making. *International Journal of Production Economics*, 84(1), 85-100. DOI: [10.1016/S0925-5273\(02\)00380-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00380-8)
- [٦٢] Jafari, A., Jafarian, M., Zareei, A., & Zaerpour, F. (2008). Using fuzzy Delphi method in maintenance strategy selection problem. *Journal of Uncertain Systems*, 2(4), 289-298. DOI: [10.1016/S0925-5273\(02\)00380-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00380-8)
- [٦٣] Cheng, Y.-H., & Tsao, H. L. (2010). Rolling stock maintenance strategy selection, spares parts' estimation and replacement' interval calculation. *International Journal of Production Economics*, 128(1), 404-412. DOI: [10.1016/j.ijpe.2010.07.038](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.07.038)
- [٦٤] Zaim, S., Turkyilmaz, A., Acar, M. F., Al-Turki, U. M., & Demirel, O. F. (2012). Maintenance strategy selection using AHP and ANP algorithms: a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(1), 16-29. <https://doi.org/10.1108/13552511211226166>
- [٦٥] Aghaie, M., & Fazli, S. (2012). An improved MCDM method for maintenance approach selection: a case study of auto industry. *Management Science Letters*, 2(1), 137-146. DOI: [10.5267/j.msl.2011.09.012](https://doi.org/10.5267/j.msl.2011.09.012)
- [٦٦] Kumar, G., & Maiti, J. (2012). Modeling risk-based maintenance using fuzzy analytic network process. *Expert Systems with Applications*, 39(11), 9946-9954. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.004>
- [٦٧] Rahimi, M., Sadinejad, S., & Khalili-Damghani, K. (2014). Selecting the most appropriate maintenance strategies using fuzzy analytic network process: a case study of Saipa vehicle industry. *Decision Science Letters*, 3(2), 237-242. DOI: [10.5267/j.dsl.2013.10.003](https://doi.org/10.5267/j.dsl.2013.10.003)
- [٦٨] Li, C., Xu, M., & Guo, S. (2007). ELECTRE III based on ranking fuzzy numbers for deterministic and fuzzy maintenance strategy decision problems. *Automation and Logistic IEEE International Conference Proceedings*, Jinan, pp. 309-312.
- [٦٩] Attar, S. F., Mohammadi, M., & Pasandideh, S. H. R. (2025). A Bayesian network approach to production decisions by incorporating complex causal factors. *Journal of Management Science and Engineering*, 10(2), 262-278. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2025.03.002>
- [٧٠] Mousavi, S., Nezami, F. G., Heydar, M., & Aryanejad, M. B. (2009). A hybrid fuzzy group decision making and factor analysis for selecting maintenance strategy. *Computers & Industrial Engineering International Conference Proceedings*, Troyes, pp. 1204-1209. DOI: [10.1109/ICCIE.2009.5223824](https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223824)
- [٧١] Bashiri, M., Badri, H., & Hejazi, T. H. (2011). Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method. *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 152-164. DOI: [10.1016/j.apm.2010.05.014](https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.014)
- [٧٢] Kirubakaran, B., & Ilankumaran, M. (2016). Selection of optimum maintenance strategy based on FAHP integrated with GRA-TOPSIS. *Annals of Operations Research*, 245, 285-313. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1775-3>
- [٧٣] Borjalilu, N., & Ghambari, M. (2018). Optimal maintenance strategy selection based on a fuzzy analytical network process: A case study on a 5-MW powerhouse. *International Journal of Engineering Business Management*, 10, 1-10. <https://doi.org/10.1177/1847979018776172>
- [٧٤] Abdulgader, F. S., Eid, R., & Rouyendegh, B. D. (2018). Development of Decision Support Model for Selecting a Maintenance Plan Using a Fuzzy MCDM Approach: A Theoretical Framework. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. <https://doi.org/10.1155/2018/9346945>
- [٧٥] Antomarioni, S., Pisacane, O., Potena, D., Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Diamantini, C. (2019). A predictive association rule-based maintenance policy to minimize the probability of breakages:

application to an oil refinery. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 3661-3675. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03822-y>

- [٧٢] Shekhar, C., Kumar, N., Gupta, A., Kumar, A., & Varshney, S. (2020). Warm-spare provisioning computing network with switching failure, common cause failure, vacation interruption, and synchronized reneging. *Reliability Engineering and System Safety*, 199, 106910. [DOI: 10.1016/j.res.2020.106910](https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106910)
- [٧٧] Hashemi, S. S., Razavi Hajiagha, S. H., Zavadskas, E. K., & Amoozad Mahdiraji, H. (2016). Multicriteria group decision making with ELECTRE III method based on interval-valued intuitionistic fuzzy information. *Applied Mathematical Modelling*, 40(2), 1554-1564.
- [٧٨] Fancello, G., Carta, M., & Fadda, P. (2014). A Decision Support System Based on ELECTRE III for Safety Analysis in a Suburban Road Network. *Transportation Research Procedia*, 3, 175-184.
- [٧٩] Mu, M., Hao, J., Li, J., & Li, J. (2025). Identifying and classifying data risk sources and triggering events: A conceptual two-stage method for risk-aware data governance. *Journal of Management Science and Engineering*, 10(4), 656-677. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2025.07.003>
- [٨٠] Ouyang, L., Zhu, Y., Zheng, W., & Yan, L. (2021). An information fusion FMEA method to assess the risk of healthcare waste. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(1), 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.01.001>
- [٨١] Mikhailov, L., & Singh, M. G. (2003). Fuzzy analytic network process and its application to the development of decision support systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (Application and Reviews)*, 33(1), 33-41. [Doi: 10.1109/TSMCC.2003.809354](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2003.809354)
- [٨٢] Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1-29.
- [٨٣] Certa, A., Enea, M., Galante, G. M., & La Fata, C. M. (2009). Multi-objective human resources allocation in R&D projects planning. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3503-3523.
- [٨٤] Segismundo, A., & Augusto, P. (2008). Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: a case study in an automotive company. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25, 899-912. [Doi: 10.1108/02656710810908061](https://doi.org/10.1108/02656710810908061)
- [٨٥] Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. ASQ Quality Press, Milwaukee.
- [٨٦] Braglia, M., Frosolini, M., & Montanari, R. (2003b). Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20, 503-524. [Doi: 10.1108/02656710310468687](https://doi.org/10.1108/02656710310468687)
- [٨٧] Chang, C. L., Liu, P. H., & Wei, C. C. (2001). Failure mode and effects analysis using grey theory. *Reliability Engineering and System Safety*, 12, 211-216. [Doi: 10.1108/09576060110391174](https://doi.org/10.1108/09576060110391174)
- [٨٨] Gilchrist, W. (1993). Modeling failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 10(5). [Doi: 10.1108/02656719310040105](https://doi.org/10.1108/02656719310040105)
- [٨٩] Pillay, A., & Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*, 79, 69-85. [Doi: 10.1016/S0951-8320\(02\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00179-5)
- [٩٠] Ravi Sankar, N., & Prabhu, B. S. (2001). Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 18, 324-336. [Doi: 10.1108/02656710110383737](https://doi.org/10.1108/02656710110383737)
- [٩١] Ouyang, L., Zhu, Y., Zheng, W., & Yan, L. (2021). An information fusion FMEA method to assess the risk of healthcare waste. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(1), 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.01.001>
- [٩٢] Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon, G. K., & Yang, J. B. (2009). Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis. *Decision Support Systems*, 48, 246-256. [Doi: 10.1016/j.dss.2009.08.005](https://doi.org/10.1016/j.dss.2009.08.005)
- [٩٣] Hadi-Vencheh, A., Hejazi, S., & Eslaminasab, Z. (2013). A fuzzy linear programming model for risk evaluation in failure mode and effects analysis. *Neural Computing & Applications*, 22, 1105-1113. [Doi: 10.1007/s00521-012-0874-9](https://doi.org/10.1007/s00521-012-0874-9)
- [٩٤] Delgado, M., Verdegay, J. L., & Vila, M. A. (1992). Linguistic decision-making models. *International Journal of Intelligent Systems*, 7, 479-492. [Doi: 10.1002/int.4550070507](https://doi.org/10.1002/int.4550070507)

- [<sup>٩٤</sup>] Dyer, J. S., & Sarin, R. K. (1979). Measurable multi-attribute value functions. *Operational Research Society*, 27, 810-822. [Doi: 10.1287/opre.27.4.810](https://doi.org/10.1287/opre.27.4.810)
- [<sup>٩٥</sup>] Hsiao, W. F., Lin, H. H., & Chang, T. M. (2008). Fuzzy consensus measure on verbal opinions. *Expert Systems with Applications*, 35, 836-842. [Doi: 10.1016/j.eswa.2007.07.040](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.07.040)
- [<sup>٩٦</sup>] Bevilacqua, M., Braglia, M., & Gabbriellini, R. (2000a). Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, 16, 313-324. [Doi: 10.1002/1099-1638\(200007/08\)16](https://doi.org/10.1002/1099-1638(200007/08)16)
- [<sup>٩٧</sup>] Braglia, M. (2000). MAFMA multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17, 1017-1033. [Doi: 10.1108/02656710010353885](https://doi.org/10.1108/02656710010353885)
- [<sup>٩٨</sup>] Braglia, M., Frosolini, M., & Montanari, R. (2003a). Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 19, 425-443. [Doi: 10.1002/qre.528](https://doi.org/10.1002/qre.528)
- [<sup>٩٩</sup>] Yang, Z., Bonsall, S., & Wang, J. (2008). Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. *IEEE Transactions on Reliability*, 57, 517-528. [Doi: 10.1109/TR.2008.928208](https://doi.org/10.1109/TR.2008.928208)
- [<sup>١٠٠</sup>] Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 1195-1207. [DOI: 10.1016/j.eswa.2007.11.028](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.028)
- [<sup>١٠١</sup>] Xiao, N., Huang, H. Z., Li, Y., He, L., & Jin, T. (2011). Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, 18, 1162-1170. [DOI: 10.1016/j.engfailanal.2011.02.004](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004)
- [<sup>١٠٢</sup>] Zhang, Z., & Chu, X. (2011). Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 38, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.046>
- [<sup>١٠٣</sup>] Braglia, M., Castellano, D., & Frosolini, M. (2013). An integer linear programming approach to maintenance strategies selection. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30(9), 991-1016. [DOI: 10.1108/IJQRM-05-2012-0059](https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2012-0059)
- [<sup>١٠٤</sup>] Yuksel, I., & Dagdeviren, M. (2010). Using the fuzzy analytic network process (ANP) for balanced score card (BSC): a case study for manufacturing firm. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1270-1278. [DOI: 10.1016/j.eswa.2009.06.002](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.002)
- [<sup>١٠٥</sup>] Shyur, H. J. (2006). COTS evaluation using modified TOPSIS and ANP. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 177(1), 251-259. [DOI: 10.1016/j.amc.2005.11.006](https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.11.006)
- [<sup>١٠٦</sup>] Boran, S., Goztep, K., & Yavuz, E. (2008). A study on election of personnel based on performance measurement by using analytic network process (ANP). *International Journal of Computer Science and Network Security*, 8(4), 333-339.
- [<sup>١٠٧</sup>] Dagdeviren, M., Yuksel, I., & Kurt, M. (2008). A fuzzy analytic network process (ANP) model to identify faulty behavior risk (FBR) in work system. *Journal of Safety Science and Resilience*, 46(5), 771-783. [DOI: 10.1016/j.ssci.2007.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.02.002)
- [<sup>١٠٨</sup>] Ayag, Z., & Ozdemir, R. G. (2009). A hybrid approach to concept selection through fuzzy analytic network process. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 368-379. [DOI: 10.1016/j.cie.2008.06.011](https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.06.011)
- [<sup>١٠٩</sup>] Yazgan, H. R. (2011). Selection of dispatching rules with fuzzy ANP approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(5-8), 651-667. [DOI: 10.1007/s00170-010-2739-7](https://doi.org/10.1007/s00170-010-2739-7)
- [<sup>١١٠</sup>] Mikhailov, L., & Singh, M. G. (2003). Fuzzy analytic network process and its application to the development of decision support systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (Application and Reviews)*, 33(1), 33-41. [DOI: 10.1109/TSMCC.2003.809354](https://doi.org/10.1109/TSMCC.2003.809354)
- [<sup>١١١</sup>] Guneri, A. F., Cengiz, M., & Seker, S. (2009). A fuzzy ANP approach to shipyard location selection. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 7992-7999. [DOI: 10.1016/j.eswa.2008.10.059](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.059)
- [<sup>١١٢</sup>] Boran, S., & Goztepe, K. (2010). Development of a fuzzy decision support system for commodity acquisition using fuzzy analytic network process. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 1939-1945. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.017>

- [114] Yuksel, I., & Dagdeviren, M. (2010). Using the fuzzy analytic network process (ANP) for balanced score card (BSC): a case study for manufacturing firm. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1270-1278. DOI: [10.1016/j.eswa.2009.06.002](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.002)
- [115] Zegordi, S. H., Nik, E. R., & Nazari, A. (2012). Power plant project risk assessment using a fuzzy-ANP and fuzzy-TOPSIS method. *International Journal of Engineering*, 25(2), 107-120.
- [116] García-Melón, M., Ferrís-Oñate, J., Aznar-Bellver, J., & Aragonés-Beltrán, P. (2008). Farmland appraisal based on the analytic network process. *Journal of Global Optimization*, 42, 143-155. DOI: [10.1007/s10898-007-9235-0](https://doi.org/10.1007/s10898-007-9235-0)
- [117] Önüt, S., & Soner, S. (2008). Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment. *Waste Management*, 28, 1552-1559. DOI: [10.1016/j.wasman.2007.05.019](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.05.019)
- [118] Matin, A., Zare, S., Ghotbi-Ravandi, M., & Jahani, Y. (2020). Prioritizing and weighting determinants of workers' heat stress control using an analytical network process (ANP) a field study. *Urban Climate*, 31, 100587.
- [119] Fernandez Portillo, L. A., Nekhay, O., & Estepa Mohedano, L. (2019). Use of the ANP methodology to prioritize rural development strategies under the LEADER approach in protected areas. The case of Lagodekhi. Georgia. *Land Use Policy*, 88, 104121.
- [120] Meyer, C. D. (2000). Matrix analysis and applied linear algebra. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. PA, United States. ISBN: 978-0-89871-454-458.
- [121] Chang, D. Y. (1996). Applications of extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655. DOI: [10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- [122] Yoon, K. P., & Hwang, C. L. (1995). Multiple Attribute Decision Making: An Introduction. Vol. 104, Sage Publications, Thousand Oaks, CA. <https://doi.org/10.4135/9781412985161>
- [123] Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications. Taylor & Francis group, Boca Raton.
- [124] Hashemi, S. S., Razavi Hajiagha, S. H., Zavadskas, E. K., & Amoozad Mahdiraji, H. (2015). Multicriteria group decision making with ELECTRE III method based on interval-valued intuitionistic fuzzy information. *Applied Mathematical Modelling*, 40(2), 1554-1564.
- [125] Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1-29.
- [126] Vincke, P. (1992). Multicriteria Decision-Aid (translated from French by Marjorie Gassner). John Wiley and Sons, Chichester, England, 154 pp.
- [127] ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. (Edition 3, 2016).
- [128] Yager, R. R., & Filev, D. P. (1994). Essentials of fuzzy modeling and control. John Wiley & Sons, New York.
- [129] Nazarizadeh, F., Alemtabriz, A., Zandieh, M., & Raad, A. (2022). An analytical model for reliability assessment of the rail system considering dependent failures (case study of Iranian railway). *Reliability Engineering and System Safety*, 227, 108725. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108725>
- [130] Carnero, M. (2006). An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programs. 91(8), 945-963.
- [131] Ekmekçioğlu, M., & Kutlu, A. C. (2012). A fuzzy hybrid approach for fuzzy process FMEA: An application to a spindle manufacturing process. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 5(4), 611-626.
- [132] Dinmohammadi, A., & Shafiee, M. (2017). Determination of the most suitable technology transfer strategy for wind turbines using an integrated AHP-TOPSIS decision model. *Energies*, 10(5), 642.
- [133] Zammori, F., Bertolini, M., & Mezzogori, D. (2020). A constructive algorithm to maximize the useful life of a mechanical system subjected to ageing, with non-resuppliable spares parts. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(1), 17-34.
- [134] Chou, J., Platt, C. D., Habiballah, S., Nguyen, A. A., Elkins, M., Weeks, S., ... & Cheng, L. (2021). Mechanisms underlying genetic susceptibility to multisystem inflammatory syndrome in children (MIS-C). *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 148(3), 732-738.