

Failure Modes Identification and Prioritization Using the Fuzzy Best–Worst and Fuzzy VIKOR Approaches in the Automotive Parts Manufacturing Industry

Mostafa Kazemi* 

Department of Management, Faculty of
Economics and Administrative Sciences,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,
Iran.

Saba Seyrani 

Department of Management, Faculty of
Economics and Administrative Sciences,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,
Iran.

Zahra Naji Azimi 

Department of Management, Faculty of
Economics and Administrative Sciences,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,
Iran.

Abstract

In the competitive automotive parts manufacturing industry, identifying and prioritizing failure modes is essential for preventing financial losses, ensuring passenger safety, and maintaining quality. This applied, descriptive-analytical study aimed to identify and prioritize failure modes in the constant-velocity (CV) joint assembly process of an Iranian automotive parts manufacturer, integrating the Fuzzy Best–Worst Method (FBWM) and Fuzzy VIKOR (FVIKOR). Fifteen purposively selected experts participated in a three-round Delphi survey to screen risk factors and failure modes; retained factors were weighted using FBWM and failure modes ranked using FVIKOR. Severity received the highest weight among retained risk factors, and failure modes associated with tensile strength and dimensional and spline tolerances of CV-joint components received the highest corrective-action priority. Expert pairwise comparisons showed high consistency,

Received: Original Research

Review

Accepted:

ISSN: ۲۲۵۱-۸۰۳۷

eISSN: ۲۲۷۶-۵۹۸۸

and combining Delphi screening with fuzzy multi-criteria weighting and ranking improved prioritization accuracy compared with the traditional risk priority number approach, providing production managers with a reliable basis for preventive decision-making.

Keywords: Prioritization, Automotive Parts Manufacturing Industry, Fuzzy Best-Worst Method (FBWM), Fuzzy VIKOR, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Introduction

The automotive parts manufacturing sector in Iran faces persistent challenges related to product quality, safety, and reliability. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is one of the most widely used preventive quality management tools, designed to identify and prioritize potential failures before they occur (McDermott et al., ۲۰۰۹; Bagheri et al., ۲۰۱۸). The traditional Risk Priority Number (RPN) — the product of Severity, Occurrence, and Detection — has well-documented limitations: identical RPN values can arise from different risk combinations, equal weighting is assumed, and crisp scores cannot capture expert judgment ambiguity (Liu et al., ۲۰۱۳; Yousefi et al., ۲۰۱۸). Recent literature calls for replacing RPN with fuzzy multi-criteria approaches (Liu, ۲۰۱۶; Akkus, ۲۰۲۴; Liou et al., ۲۰۲۴). This study integrates three complementary methods — Delphi screening, FBWM for criterion weighting, and FVIKOR for failure mode ranking — in the context of CV-joint assembly, a safety-critical powertrain component. No prior study has simultaneously applied all three elements in the Iranian automotive parts sector, nor provided empirical sensitivity validation and an RPN comparison.

Methodology

This applied, descriptive-analytical study was conducted via a survey approach. A panel of fifteen purposively selected experts from a CV-joint manufacturer — drawn from quality, production engineering, R&D, sales, and senior assembly roles, each with at least ten years of experience — participated in all study phases. Delphi screening used a five-point Likert scale with an acceptance threshold of ۳; termination

required Kendall's W change less than ۰,۰۲ between rounds and no further item elimination. Five candidate criteria (severity, occurrence, detection, cost, time) were screened in three rounds. The four retained criteria were weighted using FBWM with the nonlinear optimization model solved in Lingo; weights were defuzzified using the Graded Mean Integration Representation (GMIR) method (Chen & Hsieh, ۱۹۹۹) as standardized in Guo and Zhao (۲۰۱۷). The consistency ratio was computed as $CR = k^*/CI$. Seventy-one potential failure modes were screened to ۶۸ through three Delphi rounds. The ۶۸ retained failure modes were evaluated using fuzzy linguistic scales (Patil & Kant, ۲۰۱۴) and ranked by FVIKOR (Opricovic, ۲۰۱۱) with compromise parameter $v = ۰,۵$, defuzzifying S , R , and Q using $(1+\sqrt{m}+u)/4$. A sensitivity analysis across $v \in \{۰, ۰,۲۵, ۰,۵, ۰,۷۵, ۱\}$ and an illustrative RPN comparison were also conducted for a ۱۲-FM subsample.

Findings

FBWM yielded weights of ۰,۴۰۸ (severity), ۰,۲۶۵ (cost), ۰,۱۸۶ (occurrence), and ۰,۱۳۹ (detection). The consistency ratio $CR \approx ۰,۰۶۴$ confirmed high expert agreement. The 'time' criterion was eliminated in Delphi round ۱ (mean = ۲,۹۳۳). Three failure modes were eliminated in the failure-mode Delphi round ۱. Cronbach's alpha was ۰,۹۱ (round ۲) and ۰,۹۰ (round ۳); Kendall's W was ۰,۲۴۷ (round ۲) and ۰,۲۵۴ (round ۳). FVIKOR ranked all ۶۸ failure modes; the five highest-priority were: FM۳۲ — Insufficient tensile force in TRUNNION test ($Q = ۰,۰۱۹۵$); FM۶۵ — Low Stopper Bearing tensile strength ($Q = ۰,۰۳۴۹$); FM۵۶ — Spline deformation ($Q = ۰,۰۳۵۲$); FM۴ — Dimensional non-conformance ($Q = ۰,۰۳۶۴$); FM۱۳ — Shaft contact with Boot edge ($Q = ۰,۰۴۶۸$). The RPN comparison showed that failure modes with high detection difficulty but low severity (FM۶۴, FM۶۷) are over-ranked by the simple additive approach relative to FVIKOR. The sensitivity analysis demonstrated full robustness: {FM۳, FM۴, FM۶۵, FM۶۶} occupied the top four positions across all five v values, and the ordering of the remaining eight subsample failure modes was completely unchanged.

Discussion and Results

The findings confirm that integrating Delphi screening, FBWM weighting, and FVIKOR ranking provides a robust approach to failure mode prioritization. The dominance of severity (weight = ۰,۴۰۸) reflects the safety-critical nature of the CV joint. FVIKOR's superiority over simple additive scoring is most apparent when criticality is concentrated in high-severity or high-cost criteria. The study extends existing literature as the first to simultaneously apply all three elements (Delphi, FBWM, FVIKOR) in Iranian automotive parts manufacturing, and provides empirical sensitivity validation and an RPN comparison. A key limitation is that raw decision matrix data could not be fully disclosed due to company confidentiality.

Conclusion

This study demonstrated that the Delphi–FBWM–FVIKOR framework effectively identifies and prioritizes failure modes in CV-joint manufacturing. The three highest-priority failure modes — insufficient tensile force in the TRUNNION test, low Stopper Bearing tensile strength, and spline deformation — warrant immediate corrective action. The consistency ($CR \approx ۰,۰۶۴$) and robustness (full rank stability across all v values) confirm the reliability of the approach. Future research should replicate the framework across multiple production lines and explore K-means expert clustering prior to FBWM weighting, following Amoozad Mahdiraji et al. (۲۰۲۲).

شناسایی و اولویت‌بندی حالات شکست با استفاده رویکرد بهترین-بدترین فازی و ویکورفازی در صنعت قطعه‌سازی خودرو

مصطفی کاظمی*



گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



سبا سیرانی

گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



زهرا ناجی عظیمی

گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

در صنعت رقابتی قطعه‌سازی خودرو، شناسایی و اولویت‌بندی دقیق حالت‌های شکست به‌منظور پیشگیری از خسارات مالی، تضمین ایمنی سرنشینان و حفظ استانداردهای کیفی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است؛ چراکه مدیریت ریسک نظام‌مند به‌طور مستقیم بر بهره‌وری تولید و قابلیت اطمینان محصولات نهایی تأثیر می‌گذارد. پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی حالت‌های شکست در فرآیند مونتاژ مجموعه پلوس در یک شرکت ایرانی قطعه‌سازی خودرو، با به‌کارگیری رویکرد ترکیبی روش بهترین-بدترین فازی و ویکورفازی انجام شد. این پژوهش از لحاظ هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است که به شیوه پیمایشی اجرا شد. در این راستا، پانزده خبره به‌صورت هدفمند انتخاب و طی سه دور پرسشنامه دلفی (با طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت) به غربالگری شاخص‌های ریسک و حالت‌های بالقوه شکست پرداختند؛ سپس شاخص‌های باقی‌مانده با روش بهترین-بدترین فازی وزن‌دهی و حالت‌های خرابی غربال‌شده با روش ویکور فازی رتبه‌بندی شدند. یافته‌ها نشان داد شاخص شدت در میان شاخص‌های منتخب بیشترین وزن نسبی را به خود اختصاص داد و حالت‌های شکست مرتبط با مقاومت کششی و تیرانس‌های ابعادی و هزارخار قطعات مجموعه پلوس، بالاترین اولویت را برای اقدامات اصلاحی کسب کردند. مقایسات زوجی خبرگان از سازگاری بالایی برخوردار بود و ترکیب غربالگری دلفی با وزن‌دهی و رتبه‌بندی چندمعیاره فازی، دقت اولویت‌بندی را نسبت به رویکرد سنتی عدد اولویت ریسک بهبود بخشید. یافته‌های این پژوهش مبنایی قابل‌اعتماد و تکرارپذیر برای تصمیم‌گیری پیشگیرانه و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید در صنعت قطعه‌سازی خودرو در اختیار مدیران تولید قرار می‌دهد.

* نویسنده مسئول: kazemi@um.ac.ir

کلیدواژه‌ها: اولویت‌بندی، صنعت قطعه‌سازی خودرو، روش بهترین-بدترین فازی، ویکور فازی،
حالت شکست و تجزیه و تحلیل اثرات

مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مدیریت صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد است.

آماده انتشار

مقدمه

صنعت قطعه‌سازی خودرو در ایران، به‌عنوان یکی از ارکان زنجیره تأمین خودروسازی کشور، همواره با چالش‌های اساسی در حوزه کیفیت، ایمنی و قابلیت اطمینان محصولات روبرو بوده است. در این میان، تحلیل حالات و اثرات شکست به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین ابزارهای مدیریت کیفیت پیشگیرانه، با هدف شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی خرابی‌های بالقوه پیش از وقوع آن‌ها در طراحی یا فرآیند تولید به کار گرفته می‌شود (باقری، یوسفی و رضائی، ۲۰۱۸؛ ۲۰۰۹؛ Beauregard, & McDermott, Mikulak). به کارگیری این ابزار در مراحل اولیه طراحی محصول یا فرآیند، با کاهش هزینه‌های اصلاح، کاهش زمان توقف خطوط تولید و ارتقای قابلیت اطمینان محصول نهایی همراه است.

با این حال، اولویت‌بندی سنتی حالت‌های شکست در FMEA^۱ بر مبنای عدد اولویت ریسک - یعنی حاصل ضرب سه عامل شدت، وقوع و تشخیص - با کاستی‌های متعددی روبروست: ترکیب‌های عددی متفاوت از این سه عامل می‌توانند RPN^۲ یکسانی تولید کنند، اهمیت نسبی این عوامل یکسان فرض می‌شود، و تعیین قطعی آن‌ها در شرایطی که قضاوت خبرگان ماهیتی کیفی و مبهم دارد، دشوار است (Liu, Liu & Liu, ۲۰۱۳؛ Yousefi, Alizadeh, Hayati & Bagheri, ۲۰۱۸). مرورهای اخیر بر ادبیات این حوزه نیز همچنان بر ضرورت جایگزینی RPN با رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳ فازی تأکید می‌کنند (Liu, ۲۰۱۶؛ Akkus, ۲۰۲۴؛ Liou, Guo, Huang & Yang, ۲۰۲۴).

در پاسخ به این کاستی‌ها، روش بهترین-بدترین^۴ (رضایی، ۲۰۱۵) با کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی نسبت به فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، امکان وزن‌دهی نسبی و منعطف معیارها را فراهم می‌سازد و توسعه فازی آن یعنی روش بهترین-بدترین فازی^۵ (Guo & Zhao, ۲۰۱۷)، عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های زبانی خبرگان را نیز پوشش می‌دهد. در ادامه فرآیند تصمیم‌گیری، روش ویکور فازی^۶ (Opricovic, ۲۰۱۱) امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها (در اینجا، حالت‌های خرابی) را بر مبنای نزدیک‌ترین فاصله به راه‌حل توافقی فراهم

^۱ Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

^۲ Risk Priority Number (RPN)

^۳ Multiple Criteria Decision-Making (MCDM)

^۴ Best-Worst Method (BWM)

^۵ Fuzzy Best-Worst Method (FBWM)

^۶ Fuzzy VIKOR (FVIKOR)

می‌آورد. پژوهش‌های متعددی این دو روش را با FMEA ترکیب کرده‌اند؛ برای نمونه، تیان، وانگ و ژانگ (Tian, Wang & Zhang, ۲۰۱۸) رویکردی تلفیقی از بهترین-بدترین فازی، آنتروپی نسبی و ویکور را برای FMEA پیشنهاد دادند، قوشچی، یوسفی و خزائیلی (Ghoushchi, Yousefi & Khazaeili, ۲۰۱۹) با ترکیب بهترین-بدترین فازی و Z-MOORA، خرابی‌های صنعت قطعات یدکی خودرو را اولویت‌بندی نمودند و یوسسان و همکاران (Yucesan, Gul & Celik, ۲۰۲۱) رویکردی جامع مبتنی بر شبکه بیزی فازی و بهترین-بدترین را ارائه کردند.

مطالعات تازه‌تر نیز نشان می‌دهند توجه به این رویکردهای ترکیبی همچنان رو به افزایش است: لیو و همکاران (Liou, Guo, Huang & Yang, ۲۰۲۴) با ترکیب اعداد فازی نوع دو با بازه ذوزنقه‌ای، بهترین-بدترین، دیمتل و میرکاس، چارچوبی جامع برای FMEA ارائه کردند؛ آکوش (Akkus, ۲۰۲۴) بر وزن‌دهی تصمیم‌گیرندگان در محیط فازی شهودی تمرکز کرد؛ تادیچ، مارینکوویچ و کوماتینا (Tadić, Marinković & Komatina, ۲۰۲۵) رویکرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی پایتاکورین را برای اولویت‌بندی خرابی‌ها در یک تأمین‌کننده صنعت خودرو به کار بردند؛ و چاران و همکاران (Charan, Soni & Singh, ۲۰۲۶) حتی امکان خودکارسازی FMEA با مدل‌های زبانی بزرگ را بررسی کرده‌اند. این روند، اهمیت رو به رشد ترکیب FMEA با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی را در صنایع تولیدی - به‌ویژه صنعت خودرو - تأیید می‌کند. با وجود این حجم گسترده پژوهش، بررسی پیشینه (که در بخش بعد به تفصیل و در قالب جدول مقایسه‌ای ارائه شده است) نشان می‌دهد ترکیب هم‌زمان غربالگری دلفی، وزن‌دهی با بهترین-بدترین فازی، و رتبه‌بندی با ویکور فازی، در صنعت قطعه‌سازی خودرو ایران - به‌ویژه برای مجموعه‌های مکانیکی پیچیده نظیر مجموعه پلوس^۱ - کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف غلبه بر محدودیت‌های رویکرد سنتی FMEA، به شناسایی و اولویت‌بندی حالت‌های بالقوه شکست در فرآیند تولید مجموعه پلوس در یک شرکت قطعه‌سازی خودرو می‌پردازد. در این راستا، ابتدا شاخص‌ها و حالت‌های خرابی نهایی از طریق فرآیند دلفی غربال شده، سپس وزن شاخص‌ها با روش بهترین-بدترین فازی محاسبه و در نهایت، رتبه‌بندی حالت‌های خرابی با روش ویکور فازی انجام می‌شود.

^۱ Constant Velocity (CV) Joint

هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و اولویت‌بندی حالت‌های شکست در فرآیند تولید مجموعه پلوس با استفاده از رویکرد ترکیبی دلفی، بهترین-بدترین فازی و ویکور فازی است. سؤال اصلی پژوهش این است: «شناسایی و اولویت‌بندی حالت‌های شکست در صنعت قطعه‌سازی خودرو به چه نحوی است؟» سؤالات فرعی پژوهش عبارت‌اند از: (۱) شاخص‌های حالت‌های شکست کدام‌اند؟ (۲) وزن هر یک از این شاخص‌ها به چه میزان است؟ (۳) چه حالت‌های شکستی شناسایی شدند؟ (۴) اولویت‌بندی این حالت‌ها به چه ترتیب است؟ و (۵) بر اساس نتایج اولویت‌بندی چه پیشنهادهایی قابل ارائه است؟

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در داخل کشور، FMEA را در صنایع ایرانی به کار گرفته‌اند. روانستان و همکاران (۱۳۹۶) با ترکیب FMEA، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ فازی و DANP فازی، استراتژی‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین ایران خودرو را وزن‌دهی و اولویت‌بندی نمودند. صیامیان و همکاران (۱۴۰۰) با تلفیق FMEA و تحلیل درخت خطا^۲، ریسک‌های بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست صنعت خودروسازی را ارزیابی کرده و فعالیت‌های تولید قطعات فایبرگلاس را پرریسک‌ترین فعالیت شناسایی کردند. معصوم‌بیگی و همکاران (۱۴۰۲) با شناسایی فعالیت‌های تولیدی و به‌کارگیری روش شناسایی خطر به همراه FMEA در یک واحد باتری‌سازی، خطرات با عدد اولویت ریسک بالاتر از ۱۴۵ را ریسک‌های مهم تلقی و نسبت هزینه وقوع حوادث به هزینه پیشگیری را برآورد کردند.

در سطح بین‌المللی، حجم قابل‌توجهی از پژوهش‌ها FMEA را با رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در صنعت خودرو ترکیب کرده‌اند (جدول ۱). اکمکچی‌اوغلو و کوتلو (Kutlu & Ekmekçioğlu, ۲۰۱۲) با تلفیق TOPSIS فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، حالت‌های بالقوه خرابی یک واحد تولیدی کوچک خودرو را اولویت‌بندی کردند؛ چانگ و همکاران (Chang, Chang & Lee, ۲۰۱۴) با TOPSIS-DEMATEL ریسک شکست را در یک شرکت متالورژی پودر فعال در تولید قطعات خودرو رتبه‌بندی نمودند؛ میرزایی و آوخ‌درستانی (Mirzaei & Avakhdarestani, ۲۰۱۶) با ترکیب اولویت فازی و فرآیند شبکه تحلیلی فازی، فرآیند رنگ‌آمیزی یک شرکت خودروسازی ایرانی را ارزیابی کردند؛ بلوچ و محمدیان (Baloch &

^۱ Analytical Hierarchy Process (AHP)

^۲ Failure Tree Analysis (FTA)

(Mohammadian, ۲۰۱۶) با ترکیب تحلیل پوششی داده‌ها، ویکور فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تولید رادیاتور خودرو را تحلیل کردند؛ ساکتیول و همکاران، در دو مطالعه (Sakthivel & Ikua, ۲۰۱۷؛ Sakthivel & Saravanakumar, ۲۰۱۸)، با ترکیب فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با تحلیل رابطه خاکستری-تاپسیس و سپس با تاپسیس و ویکور فازی، ریسک تولید کلاهک گردوغبار خودرو را ارزیابی کردند؛ باینال و همکاران (Baynal, Sari & Akpinar, ۲۰۱۸) با تحلیل رابطه خاکستری و FMEA، مشکلات خط مونتاژ یک شرکت خودروسازی ترکیه را بررسی کردند؛ یوسفی و همکاران (Yousefi, Alizadeh, Hayati & Bagheri, ۲۰۱۸) با رویکرد تحلیل پوششی داده‌های قوی، ریسک‌های بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست صنعت قطعات یدکی خودرو را اولویت‌بندی و نتایج را با عدد اولویت ریسک سنتی و تحلیل پوششی داده‌های استاندارد مقایسه کردند؛ و قوشچی و همکاران (Ghoushchi, Yousefi & Khazaeili, ۲۰۱۹) با ترکیب بهترین-بدترین فازی و Z-MOORA، خرابی‌های همین صنعت را رتبه‌بندی و با FMEA سنتی مقایسه نمودند.

روند توسعه این رویکردهای ترکیبی در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ نیز تداوم یافته است. تیان و همکاران (Tian, Wang & Zhang, ۲۰۱۸) بهترین-بدترین فازی، آنتروپی نسبی و ویکور فازی را تلفیق کردند؛ یوسسان و همکاران (Yucesan, Gul & Celik, ۲۰۲۱) رویکردی جامع مبتنی بر شبکه بیزی فازی و بهترین-بدترین فازی برای FMEA ارائه دادند؛ سوماستو و همکاران (Sumasto et al., ۲۰۲۴) با تلفیق FMEA و تحلیل سیستم اندازه‌گیری، کنترل کیفیت صنعت قطعات خودرو اندونزی را ارتقا دادند؛ اکبر و همکاران (Akbar, Naseem, Ahmad & Zaman, ۲۰۲۴) با شبیه‌سازی مونت کارلو و دیمل، ریسک فرآیندهای تولیدی را تحلیل و اولویت‌بندی کردند؛ لیو و همکاران (Liou, ۲۰۲۴) با اعداد فازی نوع دو دوزنقه‌ای، بهترین-بدترین، دیمل و میرکاس را ترکیب نمودند؛ فن و همکاران (Fan, Zhu & Wu, ۲۰۲۴) ویکور را با اعداد زبانی فازی بازه‌ای Z تلفیق کردند؛ آکوش (Akkus, ۲۰۲۴) بر وزن‌دهی تصمیم‌گیرندگان در محیط فازی شهودی تمرکز کرد؛ تادیچ و همکاران (Tadić, Marinković & Komatina, ۲۰۲۵) از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی پایتاگورین بازه‌ای برای اولویت‌بندی خرابی‌ها در یک تأمین‌کننده صنعت خودرو استفاده کردند؛ و چاران و

همکاران (Charan, Soni & Singh, ۲۰۲۶) حتی امکان خودکارسازی FMEA با مدل‌های زبانی بزرگ و بازیابی افزوده را بررسی نمودند. در زمینه‌ای مرتبط، آموزاد مهدی‌راجی و همکاران (Amoozad Mahdiraji, Hafeez, Kord & Abbasi, ۲۰۲۲) با ترکیب دلفی، بهترین-بدترین فازی، خوشه‌بندی K-میانگین و کوپراس فازی، شکایات مشتریان صنعت خودرو ایران را خوشه‌بندی، وزن‌دهی و اولویت‌بندی کردند؛ این مطالعه نمونه‌ای عملی از به‌کارگیری خوشه‌بندی خبرگان/داده‌ها پیش از وزن‌دهی فازی است که در بخش محدودیت‌ها و پیشنهادهای پژوهش‌های آتی بدان پرداخته می‌شود.

جدول ۱. مقایسه پژوهش‌های پیشین مرتبط با FMEA و رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی

نویسندگان و سال	روش پیشنهادی	حوزه / صنعت کاربرد	دلفی	(F)BW M	(F)VIKO R	مقایسه RPN	تحلیل حساسیت
Ghoushchi, Yousefi & Khazaeili (۲۰۱۹)	FBWM – Z-MOORA	قطعات یدکی خودرو	X	✓	X	✓	X
Amoozad Mahdiraji et al. (۲۰۲۲)	Fuzzy Delphi – FBWM – K-means – FCOPRAS	خودرو ایران (صدای مشتری)	✓	✓	X	X	X
Yucesan, Gul & Celik (۲۰۲۱)	Fuzzy Bayesian Network – FBWM	عمومی	X	✓	X	X	X
Sumasto et al (۲۰۲۴)	FMEA – MSA	قطعات خودرو (اندونزی)	X	X	X	X	X
Akbar, Naseem, Ahmad & Zaman (۲۰۲۴)	Monte Carlo – DEMATEL	صنایع تولیدی	X	X	X	X	X

X	✓	X	✓	X	تصفیه هوا (عمومی)	IT ² TFN – BWM – DEMATEL – MAIRCA	Liou ,Guo, Huang & Yang (۲۰۲۴)
X	X	✓	X	X	عمومی	IVLZN – VIKOR	Fan ,Zhu &Wu (۲۰۲۴)
X	X	X	X	X	صنعت دفاعی	Intuitionisti c Fuzzy – MARCOS	Akkus (۲۰۲۴)
X	✓	X	X	X	تأمین کنند ه صنعت خودرو	Interval- Valued Pythagorea n Fuzzy AHP – FMEA	Tadić , Marinkovi ć & Komatina (۲۰۲۵)
X	X	X	X	X	عمومی	FMEA – LLM/RAG	Charan , Soni & Singh (۲۰۲۶)
*✓	*✓	✓	✓	✓	قطعه ساز ی خودرو (مجموعه پلوس)	دلفی – FBWM FVIKOR -	پژوهش حاضر (۱۴۰۳)

* مقایسه با عدد اولویت ریسک سنتی و تحلیل حساسیت پارامتر ویکور بر روی زیرنمونه‌ای از حالت‌های شکست انجام شده است (رجوع کنید به بخش یافته‌ها).

همان‌گونه که جدول ۱ نشان می‌دهد، اگرچه ترکیب دلفی با بهترین-بدترین فازی پیش‌ازاین در حوزه صدای مشتری صنعت خودرو ایران به کار رفته است (Amoozad Mahdiraji et al., ۲۰۲۲) و ترکیب بهترین-بدترین فازی با ویکور (یا روش‌های مرتبط) نیز در مطالعاتی غیر از صنعت خودرو سابقه دارد (Tian et al., ۲۰۱۸)، هیچ‌یک از مطالعات پیشین هر سه عنصر - غربالگری دلفی، وزن‌دهی با بهترین-بدترین فازی، و رتبه‌بندی با ویکور فازی - را به‌طور هم‌زمان در صنعت قطعه‌سازی خودرو به کار نبرده‌اند؛ همچنین در هیچ‌یک از مطالعات صنعت خودرو، مقایسه نتایج با عدد اولویت ریسک سنتی و تحلیل حساسیت پارامتر تعادل ویکور هم‌زمان انجام نشده است. پژوهش حاضر با پوشش این خلأ، رویکرد ترکیبی بهترین-بدترین فازی و ویکور فازی را برای نخستین بار در فرآیند

تولید مجموعه پلوس به کار می‌گیرد و علاوه بر اولویت‌بندی حالت‌های شکست، نتایج را با عدد اولویت ریسک سنتی مقایسه و پایداری اولویت‌ها را نسبت به پارامتر تعادل ویکور می‌سنجد.

روش

این پژوهش از لحاظ هدف کاربردی و از منظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی و به شیوه پیمایشی انجام شد. داده‌های مورد نیاز از طریق مطالعه ادبیات موضوع، اجرای روش دلفی و تکمیل پرسشنامه مقایسات زوجی توسط خبرگان گردآوری شدند. با توجه به ماهیت پژوهش، تعریف جامعه آماری متعارف صادق نیست؛ تیم خبرگان به صورت هدفمند از کارشناسان واحدهای مختلف انتخاب شد و فرآیند نمونه‌گیری به روش معمول معنایی ندارد.

لازم به توضیح است که ابزار دلفی در این پژوهش، طیف عددی قطعی لیکرت پنج‌درجه‌ای (۱ تا ۵) بود و غربالگری شاخص‌ها و حالت‌های بالقوه شکست بر همین مبنا صورت گرفت؛ فازی‌سازی صرفاً در دو مرحله بعدی - وزن‌دهی شاخص‌ها با روش بهترین-بدترین فازی و رتبه‌بندی حالت‌های شکست با روش ویکور فازی - که ذاتاً مبتنی بر مقایسه‌های زبانی خبرگان هستند، اعمال شد. این رویکرد دوگانه (دلفی با مقیاس قطعی برای غربالگری، و فازی‌سازی برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی) با رویه چندین مطالعه مشابه هم‌خوانی دارد (Amoozad Mahdiraji et al., ۲۰۲۲).

گام‌های اجرایی پژوهش به ترتیب عبارت بودند از: (۱) شناسایی شاخص‌های اهمیت حالت‌های شکست از ادبیات موضوع؛ (۲) غربالگری شاخص‌ها با اجرای سه دور دلفی؛ (۳) تعیین بهترین و بدترین شاخص و مقایسه آن‌ها با سایر شاخص‌ها توسط خبرگان؛ (۴) تعیین وزن نهایی شاخص‌ها با روش بهترین-بدترین فازی و حل مدل بهینه‌سازی در نرم‌افزار لینگو؛ (۴) شناسایی حالت‌های بالقوه خرابی از ادبیات و نظر خبرگان و غربالگری آن‌ها با سه دور دلفی؛ و در نهایت (۵) اولویت‌بندی حالت‌های خرابی با روش ویکور فازی و ارائه پیشنهاد‌های پیشگیرانه و تشخیصی.

تیم خبرگان. با توجه به ماهیت پژوهش، تیم خبرگان به صورت هدفمند (نمونه‌گیری هدفمند) انتخاب شد. معیارهای انتخاب عبارت بودند از: اشتغال فعلی در شرکت و داشتن حداقل ۱۰ سال سابقه کار مرتبط، با گزینش از میان کارشناسان و مدیران واحدهای کیفیت،

فنی-تولید، مهندسی و پژوهش و توسعه، فروش، و اپراتورهای ارشد خط مونتاژ پلوس - یعنی واحدهایی که دانش فنی محصول و فرآیند پلوس در آن‌ها متمرکز است. این پانل پانزده نفره به صورت ثابت و یکسان در تمامی مراحل پژوهش شامل هر سه دور دلفی شاخص‌ها، هر سه دور دلفی حالت‌های خرابی، و تکمیل پرسشنامه مقایسات زوجی بهترین-بدترین فازی مشارکت داشته است. تمرکز نسبی پانل بر واحدهای مهندسی و پژوهش و توسعه، بازتاب طبیعی تمرکز دانش فنی محصول و فرآیند مجموعه پلوس در این واحدهاست؛ این موضوع به عنوان یک محدودیت پژوهش نیز در بخش پایانی مقاله بحث شده است. اطلاعات خبرگان به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲. اطلاعات خبرگان

خبره	سطح تحصیلات	رشته تحصیلی	سمت سازمانی	واحد سازمانی	سابقه کار (سال)
۱	لیسانس	مهندسی مواد	رئیس آزمایشگاه کیفیت	کیفیت	۱۱
۲	فوق لیسانس	مهندسی مکترونیک- اتوماتیک و کنترل تولید	مدیر فنی تولید	تولید	۱۶
۳	لیسانس	مکانیک	رئیس پژوهش و توسعه پلوس	مهندسی و پژوهش و توسعه	۱۵
۴	لیسانس	مکانیک	کارشناس تولید	تولید	۱۴
۵	فوق لیسانس	مکانیک- تبدیل انرژی	مدیر مهندسی	مهندسی و پژوهش و توسعه	۲۷
۶	لیسانس	فیزیک	مدیر کیفیت	کیفیت	۲۵
۷	فوق لیسانس	مکانیک- تبدیل انرژی	کارشناس تکوین محصول پلوس	مهندسی و پژوهش و توسعه	۱۲

۸	فوق لیسانس	مکانیک	کارشناس تکوین محصول محوری	مهندسی و پژوهش و توسعه	۱۶
۹	لیسانس	مکانیک جامدات	کارشناس ساخت و تولید پلوس	مهندسی و پژوهش و توسعه	۱۷
۱۰	فوق دیپلم	ماشین افزار	سرپرست مونتاژ پلوس	تولید	۲۲
۱۱	فوق لیسانس	مکانیک	رئیس فروش بازار یدک	فروش	۱۸
۱۲	فوق دیپلم	الکترونیک- برق صنعتی	اپراتور مونتاژ پلوس	تولید	۲۶
۱۳	دیپلم	تعمیر موتور خودرو	اپراتور مونتاژ پلوس	تولید	۲۱
۱۴	فوق لیسانس	مدیریت اجرایی	کارشناس تضمین کیفیت	کیفیت	۱۶
۱۵	فوق لیسانس	متالورژی	رئیس پژوهش و توسعه محوری	مهندسی و پژوهش و توسعه	۱۲

روش بهترین-بدترین فازی (FBWM):

رضایی (رضایی، ۲۰۱۵) یک روش مبتنی بر مقایسه زوجی به نام BWM را پیشنهاد کرد که به طور انعطاف پذیر وزن معیارها را تعیین می کند. این روش از مقادیر قطعی برای انجام مقایسه های زوجی معیارها استفاده می کند و نمی تواند وزن آن ها را در یک محیط نامشخص تعیین کند. گو و ژائو ، FBWM را برای حل این نقص پیشنهاد کردند (Gou et al., ۲۰۱۷). به طور کلی مراحل FBWM برای تعیین وزن فازی معیارها به شرح زیر است:

گام ۱. تعیین مجموعه معیارهای تصمیم گیری: در این مرحله تصمیم گیرنده مجموعه معیارهایی را که برای تصمیم گیری مورد نیاز است بصورت $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ تعریف می کند.

گام ۲. تعیین بهترین و بدترین معیار (با اهمیت‌ترین و کم اهمیت‌ترین معیار):
بهترین و بدترین معیارها از دیدگاه تیم متخصص با توجه به معیارهای ارائه شده در مرحله اول شناسایی می‌شوند. بهترین معیار و بدترین معیار به ترتیب توسط C_B و C_W معرفی شده‌اند. این مرحله را می‌توان با استفاده از نظرات خبرگان یا روش دلفی تعیین نمود.

باید طیف اعداد قطعی لیکرت به اعداد فازی مثلثی طیف استاندارد فازی در مقاله گو و ژا (۲۰۱۷) تبدیل شوند.

گام ۳. مقایسه بهترین و بدترین معیار با بقیه معیارها: در این مرحله، ترجیح بهترین معیار بر سایر معیارها و همچنین ترجیح همه معیارها بر بدترین معیار تعیین می‌شود.

با استفاده از اصطلاحات زبانی بیان شده در جدول ۳ ترجیحات فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها تعیین می‌گردد. بردار بهترین نسبت به سایر معیارها به صورت زیر است:
 $\bar{A}_B = \{\bar{a}_{B1}, \bar{a}_{B2}, \dots, \bar{a}_{Bn}\}$ برای تعیین اولویت فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها استفاده می‌شود، جایی که $\bar{A}_B$ نماینده بردار فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها است. $\bar{a}_{Bj} = (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj})$ عملکرد فازی بهترین معیار C_B به معیار j را نشان می‌دهد، به طوری که $j = \{1, 2, \dots, n\}$ ، بنابراین می‌توان استدلال کرد که $\bar{a}_{BB} = (1, 1, 1)$. از سوی دیگر، تعیین ترجیح فازی همه معیارها نسبت به معیار بدترین (OW) را می‌توان با استفاده از $\bar{A}_W = \{\bar{a}_{1W}, \bar{a}_{2W}, \dots, \bar{a}_{nW}\}$ محاسبه کرد که در آن $\bar{A}_W$ نشان دهنده بردار فازی همه معیارها نسبت به بدترین معیار است. $\bar{a}_{jW} = (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW})$ عملکرد فازی معیار j را نسبت به بدترین معیار C_W نشان می‌دهد، به طوری که $j = \{1, 2, \dots, n\}$ ، بنابراین می‌توان استدلال کرد که $\bar{a}_{WW} = (1, 1, 1)$.

جدول ۳. اعداد فازی متناظر با متغیرهای زبانی (Gou et al., ۲۰۱۷)

متغیرهای زبانی	تابع عضویت
اهمیت یکسان (EI^1)	$(1, 1, 1)$
اهمیت ضعیف (WI^1)	$(2/3, 1, 3/2)$
نسبتاً مهم (FI^1)	$(3/2, 2, 5/2)$
خیلی مهم (VI^1)	$(5/2, 3, 7/2)$
کاملاً مهم (AI^2)	$(7/2, 4, 9/2)$

گام ۴. تعیین وزنهای فازی بهینه $(\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \dots, \tilde{w}_n^*)$: طبق گفته گو و ژا^۶ (Gou et al., ۲۰۱۷)، یک برنامه‌ریزی غیر خطی بر اساس مولفه‌های به دست آمده از بردارهای OW و BO در مدل زیر ارائه شده است. در این مدل، $\bar{w}_j = (l_j^w, m_j^w, u_j^w)$ و $\bar{w}_B = (l_B^w, m_B^w, u_B^w)$ به ترتیب وزن فازی معیار j ، بهترین معیار C_B و بدترین معیار C_W را نشان می‌دهند، که در آن l, m و u به ترتیب مقادیر پایین، میانی و بالایی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که w_B و w_j در FBWM عدد فازی مثلثی^۷ (TFN) هستند که با BWM بسیار متفاوت هستند (Gou et al., ۲۰۱۷).

^۱ Equally Important

^۲ Weakly important

^۳ Fairly important

^۴ Very important

^۵ Absolutely important

^۶ S. Guo, H. Zhao

^۷ Triangular Fuzzy Number (TFN)

$$\min \xi^k$$

$$s.t. \begin{cases} \left| \frac{(l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}) \right| \leq (k^*, k^*, k^*) \\ \left| \frac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_W^w, m_W^w, u_W^w)} - (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW}) \right| \leq (k^*, k^*, k^*) \\ \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1 \\ l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w \\ l_j^w \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (\text{مدل ۱})$$

جایی که $\tilde{\zeta}^* = (k^*, k^*, k^*)$; $k^* \leq \tilde{\zeta} = (l^\zeta, m^\zeta, u^\zeta)$; $l^\zeta \leq m^\zeta \leq u^\zeta$ لازم به ذکر است که R یک مجموعه است و اگر تابع عضویت آن $\mu_{\tilde{A}}(X): R \rightarrow [0, 1]$ در بخش تعریف ۱ آمده باشد، یک عدد فازی $\tilde{A}$ روی R به عنوان TFN تعریف می شود.

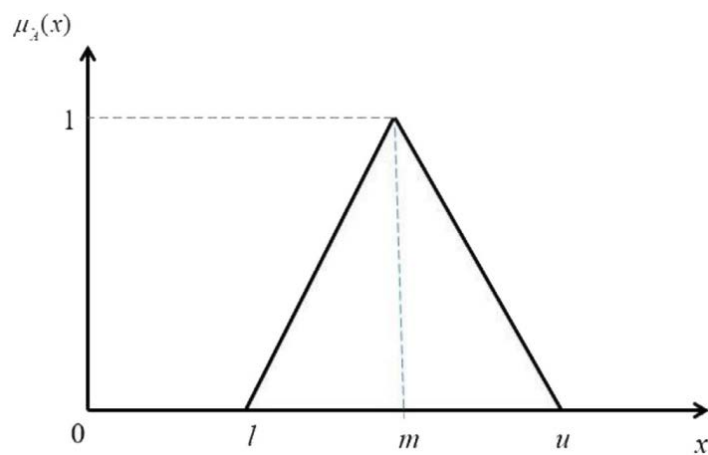
تعریف ۱. مجموعه فازی $\tilde{A}$ تعریف شده در مجموعه مرجع X مانند رابطه ۱ است.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (\text{رابطه ۱})$$

جایی که $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0, 1]$ تابع عضویت مجموعه $\tilde{A}$ است. مقدار عضویت $\mu_{\tilde{A}}(x)$ درجه وابستگی $x \in X$ را در $\tilde{A}$ نشان می دهد.

تعریف ۲. عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ بصورت سه گانه (l, m, u) تعریف می شود، تابع عضویت با رابطه ۲ و شکل ۲ نشان داده می شود.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \in (-\infty, l) \\ \frac{x-l}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{u-x}{u-m} & x \in [m, u] \\ 0 & x \in (u, \infty) \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲})$$



شکل ۲. اعداد مثلثی فازی (گو و همکاران، ۲۰۱۷)

گام ۵. حل مدل: مدل توسط نرم افزار لینگو حل و اوزان معیارها حاصل می شود.

بعد از محاسبه اوزان همه معیارها به کمک روش دی فازی اعداد مثلثی به اعداد قطعی تبدیل می شوند تا براساس آن اولویت بندی شوند.

فازی زدایی (دی فازی^۱):

زمانیکه طیف فازی مناسب انتخاب شد و عملیات فازی بر روی مقادیر انجام شد در نهایت به نتایجی خواهید رسید که فازی اند. این نتایج فازی به سادگی قابل فهم و تفسیر نیستند از این جهت باید به اعداد قطعی (معمولی) تبدیل شوند. روش های مختلفی برای این کار

^۱ Defuzzification

پیشنهاد شده است. در پژوهش حاضر از روش نمایش یکپارچه میانگین درجه‌بندی شده (Chen & Hsieh, ۱۹۹۹) استفاده شده است.

$$R(\bar{W}_j) = \frac{l_j^w + 4 \times m_j^w + u_j^w}{6} \quad (\text{رابطه ۳})$$

گام ۶. در مقایسات زوجی سازگاری کامل به سختی برقرار می‌شود و مقایسات تا حدی دارای ناسازگاری هستند و پژوهشگر نیازمند نرخ سازگاری است تا نشان دهد که مقایسات زوجی تا چه میزان سازگار هستند. برای همین از رابطه ۴ استفاده شده است:

$$CR = \frac{k^*}{CI} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، k^* از حل مدل لینگو بدست آمده و شاخص سازگاری بر اساس مقدار $\bar{a}_{BW}$ به همراه عدد فازی مثلی در جدول ۴ نشان داده شده است. اگر مقدار CR کوچکتر مساوی ۰,۲۵ باشد بردارهای BO و OW دارای سازگاری بیشتری است هرچند مقدار مشخصی برای تعیین سازگاری یا عدم سازگاری بردارهای BO و OW وجود ندارد. همان $\bar{a}_{BW}$ برای تعیین سازگاری یا عدم سازگاری بردارهای BO و OW وجود ندارد. همان $\bar{a}_{BW} = (l_{BW}, m_{BW}, u_{BW})$ است در صورتی که نرخ سازگاری کوچکتر مساوی ۰,۲۵ باشد، داده‌ها از سازگاری بسیار بالایی برخوردار هستند (Gou et al., ۲۰۱۷).

جدول ۴. شاخص سازگاری (Gou et al., ۲۰۱۷)

	کاملاً مهم	خیلی مهم	نسبتاً مهم	اهمیت ضعیف	اهمیت مساوی
$\bar{a}_{BW}$	(۳,۵,۴,۴,۵)	(۲,۵,۳,۳,۵)	(۱,۵,۲,۲,۵)	(۰,۶۶۶۷,۱,۱,۵)	(۱,۱,۱)
C_i	۸,۰۴	۶,۶۹	۵,۲۹	۳,۸۰	۳

روش ویکور فازی (FVIKOR):

اپریکوویچ^۱ (۲۰۱۱) در مقاله‌ای گام‌های ویکور فازی را به صورت زیر بیان نمود.

^۱ Opricovic, S

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری ارزیابی گزینه‌ها: فرض کنید ماتریس تصمیم‌گیری نظرات افراد به شرح زیر باشد.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

هر ستون نشان دهنده یک شاخص سنجش و هر سطر نماینده یک گزینه است. x_{ij} بیانگر کمیت گزینه i ام در زیرمعیار j ام است. همچنین زیرمعیارها بر حسب اثرگذاری روی گزینه‌ها ممکن است منفی یا مثبت باشند. در این پژوهش جهت ارزیابی گزینه‌ها نسبت به هر معیار از عبارات کلامی و اعداد فازی جدول ۵ استفاده شده است.

جدول ۵. عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر جهت ارزیابی گزینه‌ها (Patil, Kant, ۲۰۱۴)

کد	اولویت	معادل فازی اولویت‌ها		
		حد پایین (l)	حد متوسط (m)	حد بالا (u)
۱	بسیار کم	۱	۱	۳
۲	کم	۱	۳	۵
۳	متوسط	۳	۵	۷
۴	زیاد	۵	۷	۹
۵	خیلی زیاد	۷	۹	۱۱

گام ۲. بی‌مقیاس نمودن ماتریس تصمیم‌گیری: در این گام بایستی تصمیم‌گیری فازی را به یک ماتریس بی‌مقیاس شده فازی نماییم. برای بدست آوردن ماتریس، بایستی مراحل طی شود:

۱-۲. تعیین ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی برای هر معیار: بهترین و بدترین هر یک از مقادیر در هر معیار شناسایی شده به ترتیب $\tilde{f}_j^*$ و $\tilde{f}_j^0$ نامیده می‌شود. در صورتی که معیار j ام، معرف سود باشد $\tilde{f}_j^*$ و $\tilde{f}_j^0$ از روابط ۵ و ۶ بدست می‌آید:

$$\tilde{f}_j^* = \max_i \tilde{f}_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\tilde{f}_j^o = \min_i \tilde{f}_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{رابطه ۶})$$

ولی در صورتی که معیار ژام، معرف هزینه باشد $\tilde{f}_j^o$ و $\tilde{f}_j^*$ از روابط ۷ و ۸ بدست می آید:

$$\tilde{f}_j^* = \min_i \tilde{f}_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$\tilde{f}_j^o = \max_i \tilde{f}_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{رابطه ۸})$$

۲-۲. بدست آوردن مقادیر نرمالایز شده: اگر (l_j^*, m_j^*, u_j^*) و $\tilde{f}_j^o$ و $\tilde{f}_j^*$

(l_j^o, m_j^o, u_j^o) باشد، مقادیر نرمالیزه شده بدین صورت بدست می آید:

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{\tilde{f}_j^* \ominus \tilde{f}_{ij}}{u_j^* - l_j^o} \quad \text{for benefit Criteria} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{\tilde{f}_{ij} \ominus \tilde{f}_j^*}{u_j^o - l_j^*} \quad \text{for Cost Criteria} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

گام ۳. محاسبه سودمندی $(\tilde{S}_i)$ و تاسف $(\tilde{R}_i)$ گزینه‌ها: با استفاده از روابط ۱۱ و

۱۲ مقدار سودمندی و تاسف گزینه‌ها محاسبه می شود.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\tilde{R}_i = \max_j (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

گام ۴. محاسبه شاخص ویکور $(\tilde{Q}_i)$: شاخص ویکور از رابطه ۱۳ محاسبه

می شود. در این رابطه V ، وزنی برای بیشینه مطلوبیت گروهی است که مقدار آن می تواند

بین ۰ و ۱ باشد که در این پژوهش ۰,۵ در نظر گرفته شده است.

$$\tilde{Q}_i = v \frac{(\tilde{S}_i \ominus \tilde{S}^*)}{\tilde{S}^{or} - \tilde{S}^{*l}} \oplus (1 - v) \frac{(\tilde{R}_i \ominus \tilde{R}^*)}{\tilde{R}^{or} - \tilde{R}^{*l}} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در این رابطه:

$$\tilde{R}^* = \min_i \tilde{R}_i \quad (\text{رابطه ۱۶}) \quad \tilde{S}^* = \min_i \tilde{S}_i \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$\tilde{R}^{or} = \max_i \tilde{R}_i^r \quad (\text{رابطه ۱۷}) \quad \tilde{S}^{or} = \max_i \tilde{S}_i^r \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

مقادیر R ، S و Q با توجه به رابطه ۱۸ قطعی تبدیل به عدد قطعی می‌شوند.

$$Crisp = \frac{l + 2m + u}{4} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

این فرمول دیفازی‌سازی با فرمول $GMIR^1$ (نمایش یکپارچه میانگین درجه‌بندی‌شده) استفاده‌شده در دیفازی‌سازی اوزان معیارها (رابطه ۳) متفاوت است؛ این تفاوت ناشی از سلیقه پژوهشگر نیست، بلکه هر یک از این دو فرمول، روش دیفازی‌سازی استاندارد و مرجع‌دار همان مرحله است: رابطه ۳ دقیقاً همان روشی است که گو و ژائو (Guo & Zhao, ۲۰۱۷) - منبع اصلی روش بهترین-بدترین فازی در این پژوهش - برای اوزان معرفی کرده‌اند، و رابطه ۱۸ دقیقاً همان فرمولی است که اوپریکوویچ (Opricovic, ۲۰۱۱) - منبع اصلی روش ویکور فازی - برای شاخص‌های R ، S و Q ارائه کرده است. به کارگیری فرمول دیفازی‌سازی مرجع هر روش در همان مرحله، رویه‌ای پذیرفته‌شده در ترکیب این دو روش است (Tian et al., ۲۰۱۸).

گام ۵. رتبه‌بندی گزینه‌ها: گزینه‌ای به عنوان گزینه برتر است که دارای کمترین مقدار Q باشد.

آستانه غربالگری و معیار خاتمه دلفی

در هر سه دور دلفی (شاخص‌ها و حالت‌های خرابی)، تأیید یا حذف هر آیتیم از طریق مقایسه میانگین امتیاز آن با مقدار آستانه ۳ صورت گرفت. این آستانه، نقطه میانی طیف لیکرت پنج‌درجه‌ای (۱ تا ۵) است که مرز قراردادی میان قضاوت‌های «کم‌اهمیت» (نمرات ۱ و ۲) و «بااهمیت» (نمرات ۳ و ۴ و ۵) را نشان می‌دهد و با رویه رشیدی و همکاران (۱۳۹۳) هم‌خوانی دارد. آیتیم‌هایی که میانگین امتیاز آن‌ها کمتر از ۳ بود، در پایان همان دور حذف می‌شدند. فرآیند دلفی در هر دو مورد (شاخص‌ها و حالت‌های خرابی) زمانی خاتمه یافت که دو شرط برقرار شد: (۱) ضریب هماهنگی کندال بین دو دور متوالی افزایش ناچیزی نشان داد (کمتر

¹Graded Mean Integration Representation

از ۰,۰۲، و (۲) هیچ آیتم جدیدی بر اساس آستانه میانگین از دور قبل حذف نشد. مقادیر دقیق این ضرایب و نتیجه اعمال این معیار، در بخش یافته‌ها گزارش شده است.

یافته‌ها

نتایج دلفی شاخص‌های ارزیابی:

بر مبنای مطالعات پیشین، معیارهای کلاسیک تحلیل حالات شکست و اثرات شامل شدت، احتمال وقوع، قابلیت کشف، هزینه و زمان به عنوان عوامل تعیین کننده اهمیت حالات خرابی معرفی شده‌اند (McDermott et al., ۲۰۰۹). این پنج شاخص در دور اول دلفی توسط پانزده خبره بر اساس طیف لیکرت پنج درجه‌ای امتیازدهی شدند. نتایج دور اول نشان داد شاخص «زمان» با میانگین امتیاز ۲,۹۳۳ (انحراف معیار = ۱,۱۶۳) کمتر از آستانه ۳ بود و بر همان اساس، در پایان دور اول از مجموعه شاخص‌ها حذف شد؛ چهار شاخص باقی مانده (شدت، وقوع، تشخیص و هزینه) به دور دوم راه یافتند.

در دور دوم، ضریب هماهنگی کندال برابر ۰,۵۱ محاسبه شد. در دور سوم، تمامی چهار شاخص میانگین بالاتر از ۳ کسب کردند و ضریب هماهنگی کندال به ۰,۵۲۸ رسید. تفاوت ضریب کندال بین دور دوم و سوم تنها ۰,۰۱۸ بود و هیچ شاخص جدیدی حذف نشد؛ بنابراین، مطابق معیار خاتمه تعریف شده، فرآیند دلفی شاخص‌ها پس از دور سوم متوقف شد. با توجه به بیش از ده نفر بودن پانل خبرگان، این مقدار ضریب کندال از نظر آماری معنادار است (مشایخی و همکاران، ۱۴۰۰).

تعیین بهترین و بدترین شاخص و وزن دهی با روش بهترین-بدترین فازی:

از میان چهار شاخص نهایی، خبرگان به صورت جمعی شاخص شدت را به عنوان بهترین (بااهمیت ترین) و شاخص تشخیص را به عنوان بدترین (کم اهمیت ترین) معیار تعیین کردند. سپس پرسشنامه مقایسات زوجی، توسط همان پانزده خبره، بر اساس طیف پنج تایی فازی تکمیل و با روش میانگین هندسی تجميع شد. با حل مدل برنامه ریزی غیرخطی بهترین-بدترین فازی در نرم افزار لینگو (پیوست ۱)، مقدار بهینه تابع هدف $Z = k^* = ۰.۴۲۶۷$ و

وزن فازی معیارها به دست آمد. این اوزان با استفاده از فرمول $GMIR$ (رابطه ۳) دیفازی شدند تا وزن قطعی و رتبه نهایی معیارها حاصل شود (جدول ۶).

جدول ۶. نتایج دلفی، مقایسات زوجی فازی و وزن نهایی معیارها

معیار	میانگی ن دلفی دور *۳	ترجیح بهترین معیار نسبت به این معیار (a_{Bj})	ترجیح این معیار نسبت به بدترین معیار (a_{jW})	وزن فازی نهایی	وزن قطعی	ر تبه
شدت	۴,۸۶۷	(۱,۱,۱)	۲,۰۱۹,۲,۵۳۱,۳,۰۵۸ (۸)	(۰,۳۸,۰,۴۱۴,۰,۴۱۴)	۰,۴۰ ۸	۱
وقوع	۳,۲۶۷	۲,۱۱۷,۲,۶۳۳,۳,۱۷۸ ()	۱,۳۱۵,۱,۷۶۹,۲,۳۱۱ (۸)	۰,۱۳۸,۰,۱۸۸,۰,۲۲۲ (۵)	۰,۱۸ ۶	۳
تشخیص ص	۳,۷۳۳	۲,۰۱۹,۲,۵۳۱,۳,۰۵۸ (۸)	(۱,۱,۱)	(۰,۱۱۹,۰,۱۴۰,۰,۱۵۵)	۰,۱۳ ۹	۴
هزینه	۳,۶۶۷	۱,۲۵۶,۱,۷۰۸,۲,۲۵۸ (۴)	۱,۸۴۹,۲,۳۵۲,۲,۸۹۱ ()	۰,۲۲۱,۰,۲۶۹,۰,۲۹۱ (۳)	۰,۲۶ ۵	۲

* انحراف معیار دور سوم برای شدت، وقوع، تشخیص و هزینه به ترتیب برابر ۰,۳۵۲، ۰,۸۸۴، ۰,۷۹۹ و ۰,۷۲۴ بود.

برای محاسبه نرخ ناسازگاری (رابطه ۴)، مقدار a_{BW} (ترجیح فازی شدت نسبت به تشخیص) برابر (۲,۰۱۹,۲,۵۳۱,۳,۰۵۸) است که نزدیکترین مقدار به رده «خیلی مهم» (۲,۵,۳,۳,۵) با شاخص سازگاری $CI = ۰,۶۹$ می باشد (Guo et al., ۲۰۱۷). بنابراین

$$CR = \frac{k^*}{CI} = \frac{۰,۴۲۶۷}{۰,۶۹} \approx ۰,۶۱۸$$

این مقدار به طور قابل توجهی کمتر از آستانه ۰,۲۵ است و سازگاری بسیار بالای مقایسات زوجی پانل خبرگان را تأیید می کند. شایان ذکر است که مقدار $Z = ۰,۴۲۶۷$ و مقادیر متغیرهای L ، M و U برای هر چهار معیار در خروجی لینگو پیوست (۱)، مبنای محاسبه هر دو مقدار k^* (برای CR) و وزن قطعی جدول ۶ بوده اند.

شناسایی و غربالگری حالت‌های بالقوه خرابی:

در راستای تکمیل مطالعات پیشین و بهره‌گیری از دانش تخصصی حاصل از ادبیات موضوع و اطلاعات شرکت مورد مطالعه، یک مرحله نظرسنجی از خبرگان برای شناسایی حالت‌های بالقوه شکست صورت پذیرفت. در مجموع، ۷۱ حالت بالقوه شکست شناسایی و با استفاده از همان فرآیند دلفی سه‌دوره‌ای (طیف لیکرت پنج‌درجه‌ای، آستانه ۳) غربالگری شدند.

در دور اول، سه حالت خرابی میانگین کمتر از ۳ کسب کردند و حذف شدند: «عدم دسترسی سریع یا مفقودی مواد اولیه» (میانگین = ۲٫۸)، «بسته بودن بیش از حد دهانه بست در مونتاژ CIRCLIP BJ روی شافت BJ/S و پرس بست» (میانگین = ۲٫۷۳۳)، و «عدم تقارن تاج بست پس از بسته شدن» (میانگین = ۲٫۶۶۷). ۶۸ حالت باقی‌مانده به دور دوم راه یافتند. آلفای کروناخ پرسشنامه در دور دوم ۰٫۹۱ و ضریب همابستگی کندال ۰٫۲۴۷ بود؛ هیچ حالتی در دور دوم میانگین کمتر از ۳ کسب نکرد. در دور سوم، آلفای کروناخ ۰٫۹ و ضریب همابستگی کندال ۰٫۲۵۴ محاسبه شد. از آنجا که تفاوت ضریب کندال بین دور دوم و سوم تنها ۰٫۰۷ بود و هیچ حالتی حذف نشد، فرآیند دلفی پس از دور سوم متوقف شد و ۶۸ حالت بالقوه خرابی به‌عنوان فهرست نهایی پذیرفته شد.

شایان توجه است که ضریب همابستگی کندال دور سوم برای حالت‌های خرابی (۰٫۲۵۴) به‌طور قابل توجهی کمتر از مقدار متناظر برای شاخص‌ها (۰٫۵۲۸) است؛ این تفاوت ناشی از خطا نیست، بلکه بازتاب تفاوت بنیادین در تعداد آیت‌های رتبه‌بندی شده (N) در این دو فرآیند دلفی مستقل است - شاخص‌ها $N = 4$ و حالت‌های خرابی ۷۱ تا $N = 68$. ضریب همابستگی کندال به N حساس است و دستیابی به توافق کامل میان پانزده خبره بر سر رتبه‌بندی ۶۸ آیت، به‌مراتب دشوارتر از توافق بر سر چهار آیت است. با این حال، طبق مشایخی و همکاران (۱۴۰۰)، برای پانل‌های بیش از ده خبره، حتی مقادیر کوچک ضریب کندال نیز معنادار تلقی می‌شوند؛ بنابراین هر دو مقدار، همراه با روند پایدار شدن آن‌ها بین دور دوم و سوم، معیار معتبری برای خاتمه دلفی در هر دو فرآیند بوده‌اند.

اولویت‌بندی حالت‌های خرابی با روش ویکور فازی:

برای اجرای روش ویکور فازی، ماتریس تصمیم شامل ۶۸ حالت خرابی^۱ (FM ۱ تا FM ۶۸) در سطرها و چهار معیار (شدت، وقوع، تشخیص، هزینه) در ستون‌ها، بر اساس طیف فازی پنج‌درجه‌ای (Patil & Kant, ۲۰۱۴) توسط پانزده خبره تکمیل و با میانگین حسابی تجمیع شد. سپس ماتریس بی‌مقیاس و مقادیر S، R و Q برای هر حالت خرابی محاسبه گردید. به دلیل محدودیت حجمی مقاله و محرمانه بودن اطلاعات تولیدی شرکت، ماتریس تصمیم کامل در متن ارائه نشده است (پیوست ۲ و ۳). داده‌های خام در صورت درخواست مستقیم از نویسنده مسئول، با رعایت ملاحظات محرمانگی شرکت، در دسترس قرار می‌گیرد. جدول ۷ بیست حالت خرابی با بالاترین اولویت (کمترین Q) را نمایش می‌دهد؛ رتبه‌بندی کامل شصت‌وهشت حالت خرابی در فایل ضمیمه ارائه شده است (پیوست ۴).

جدول ۷. اولویت‌بندی حالت‌های شکست (بیست اولویت برتر از مجموع ۶۸ مورد)

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۱	۰,۰۱۹۵	FM ۳۲	عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION
۲	۰,۰۳۴۹	FM ۶۵	مقاومت کشش کم Stopper Bearing
۳	۰,۰۳۵۲	FM ۵۶	دفرمگی هزارخار
۴	۰,۰۳۶۴	FM ۴	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه
۵	۰,۰۴۶۸	FM ۱۳	برخورد شافت با لبه boot و خراشیدگی عمقی با پارگی
۶	۰,۰۴۸۵	FM ۲۷	قرارگیری ناصحیح TRUNNION در مونتاژ خار روی اسپایدر CIRCLIP
۷	۰,۰۶۱۳	FM ۶۶	عدم آبیندی مناسب گردگیر
۸	۰,۰۷۰۸	FM ۳۹	وجود آب در گریس
۹	۰,۰۷۵۵	FM ۳۰	عدم مونتاژ صحیح شفت در O/R

^۱ Failure Mode (FM)

۱۰	۰,۰۷۵۹	FM ۳	ریختن مواد اولیه
۱۱	۰,۰۷۷۳	FM ۴۹	بیرون زدن گردگیر در فرآیند جازدن گردگیر روی هوزینگ
۱۲	۰,۰۸۱۹	FM ۵۵	دفرمگی رزوه
۱۳	۰,۰۸۴۳	FM ۲۱	نبود سوراخ اشپیل در مونتاژ BJ/H
۱۴	۰,۰۸۴۷	FM ۲۵	نبودن Retainer
۱۵	۰,۰۸۹۷	FM ۶۳	عدم استحکام پیچشی کافی
۱۶	۰,۰۹۰۰	FM ۲۰	کم بودن تعداد ساچمه‌ها در مونتاژ BJ/H
۱۷	۰,۰۹۰۶	FM ۹	شناسایی اشتباه مواد
۱۸	۰,۰۹۴۴	FM ۶۲	عدم مقاومت پیچشی دینامیکی
۱۹	۰,۱۰۰۰	FM ۵۹	عدم وجود حک و سریال در کنترل نهایی
۲۰	۰,۱۰۲۴	FM ۴۸	عدم قرار گیری مناسب پولک و فتر در مونتاژ گردگیر و پولک

* هرچه مقدار Q یک ریسک کمتر باشد، آن ریسک بحرانی تر است؛ بر این اساس، عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش *TRUNNION* رتبه اول را از نظر بحرانی بودن کسب کرده است.

نتایج نشان داد سه حالت خرابی عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش *TRUNNION* ($Q=۰/۳۲ FM$)، $Q=۰/۱۹۵$)، مقاومت کشش کم *Stopper Bearing* ($۰/۶۵ FM$)، $Q=۰/۳۴۹$) و دفرمگی هزارخار ($۰/۵۶ FM$)، $Q=۰/۳۵۲$) بالاترین اولویت ریسک را به خود اختصاص دادند.

مقایسه با شاخص اولویت ریسک سنتی:

به منظور نشان دادن تفاوت رویکرد پیشنهادی با اولویت بندی سنتی، برای دوازده حالت خرابی که داده کامل ماتریس تصمیم آن‌ها در پیوست مقاله موجود است $FM ۱-۶$ و $fm ۶۳-۶۸$)، یک شاخص افزایشی ساده — حاصل جمع مقادیر میانه (m) اعداد فازی هر چهار معیار — محاسبه و رتبه بندی حاصل با رتبه بندی *FVIKOR* مقایسه شد (جدول ۸). نتایج نشان می دهد

برای حالاتی که امتیاز تشخیص (با وزن پایین ۰,۱۳۹ در $FBWM$) بالا و شدت (با وزن بالای ۰,۴۰۸) پایین است، دو رویکرد اختلاف قابل توجهی دارند: «عدم کشش گردگیر» ($FM^{۶۴}$) با مجموع میانه ۰/۲۲ در رتبه ششم قرار می‌گیرد، اما $FVIKOR$ آن را به رتبه ۴۶ از ۶۸ منتقل می‌کند — زیرا شدت آن ($mS=۰,۴$) پایین و تشخیص آن ($mD=۶,۶$) بالاست، در حالی که معیار تشخیص کم‌وزن‌ترین معیار است. به همین ترتیب، «آسیب دیدگی سطحی در بسته‌بندی» ($FM^{۶۷}$) در رتبه یازدهم ساده قرار می‌گیرد اما $FVIKOR$ آن را به رتبه ۶۱ می‌فرستد ($mS=۰$, $mD=۶,۲$). در مقابل، «مقاومت کشش کم $Stopper Bearing$ ($FM^{۶۵}$) با شدت بالا ($mS=۱$) و تشخیص پایین ($mD=۳,۴$) در رتبه سوم ساده و رتبه دوم $FVIKOR$ قرار می‌گیرد — این همخوانی نشان می‌دهد هنگامی که شدت و هزینه هر دو بالا باشند، دو رویکرد نتیجه مشابهی می‌دهند.

جدول ۸. مقایسه رتبه‌بندی بر اساس مجموع میانه‌های ماتریس تصمیم (معادل RPN) و روش $FVIKOR$ برای زیرنمونه ۱۲ حالت خرابی

رتبه RPN	کد	حالت بالقوه شکست	mS	mO	mD	mC	مجموع m	Q قطعی	رتبه FVIKOR (از ۶۸)	تغییر رتبه
۱	FM ۳	ریختن مواد اولیه	۷,۶۷	۵,۵۳	۷,۱۳	۶,۴۷	۲۶,۸۰	۰,۰۷۶	۱۰	۹↓
۲	FM ۴	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه	۶,۸۷	۷,۱۳	۳,۸۰	۹,۰۰	۲۶,۸۰	۰,۰۳۶	۴	۲↓
۳	FM ۶۵	مقاومت کشش کم <i>Stopper Bearing</i>	۷,۰۰	۶,۶۰	۳,۴۰	۸,۶۰	۲۵,۶۰	۰,۰۳۵	۲	۱↑
۴	FM ۶۶	عدم آب‌بندی مناسب گردگیر	۸,۶۰	۳,۴۰	۵,۰۰	۷,۰۰	۲۴,۰۰	۰,۰۶۱	۷	۳↓

۵	FM ۶۳	عدم استحکام پیچشی کافی	۷,۴۰	۳,۴۰	۵,۰۰	۷,۴۰	۲۳,۲۰	۰,۰۹۰	۱۵	۱۰↓
۶	FM ۶۴	عدم کشش گردگیر	۵,۴۰	۵,۰۰	۶,۶۰	۵,۰۰	۲۲,۰۰	۰,۱۹۹	۴۶	۴۰↓
۷	FM ۲	شناسایی اشتباه مواد اولیه	۶,۸۷	۵,۲۷	۶,۰۷	۳,۶۷	۲۱,۸۷	۰,۱۷۴	۳۸	۳۱↓
۸	FM ۵	جنس نامناسب مواد اولیه	۵,۵۳	۴,۷۳	۶,۳۳	۵,۱۳	۲۱,۷۳	۰,۱۹۱	۴۳	۳۵↓
۹	FM ۱	ضرب خوردگی مواد اولیه	۵,۶۷	۵,۱۳	۵,۵۳	۴,۸۷	۲۱,۲۰	۰,۱۸۱	۴۱	۳۲↓
۱۰	FM ۶	خواص مکانیکی نامطلوب	۷,۵۳	۴,۲۰	۵,۴۰	۴,۰۷	۲۱,۲۰	۰,۱۵۲	۳۳	۲۳↓
۱۱	FM ۶۷	آسیب دیدگی سطحی در بسته بندی	۵,۰۰	۵,۰۰	۶,۲۰	۳,۴۰	۱۹,۶۰	۰,۲۴۴	۶۱	۵۰↓
۱۲	FM ۶۸	عدم دسترسی/مفقودی در بسته بندی	۶,۲۰	۵,۴۰	۳,۰۰	۴,۶۰	۱۹,۲۰	۰,۱۴۳	۲۸	۱۶↓*

* شاخص مجموع میانه = $mS + mO + mD + mC$ ؛ رتبه بندی بر اساس مجموع میانه: بالاتر = بحرانی تر. رتبه بندی از میان ۶۸ حالت خرابی است؛ پایین تر = بحرانی تر. ردیف های رنگی نشان دهنده مهم ترین اختلاف های رتبه بندی بین دو رویکرد هستند. mS = میانه شدت، mO = میانه وقوع، mD = میانه تشخیص (وزن های $FBWM$: شدت = ۰,۴۰۸، وقوع = ۰,۱۸۶، تشخیص = ۰,۱۳۹، هزینه = ۰,۲۶۵).

تحلیل حساسیت پارامتر توافق ویکور:

به منظور ارزیابی پایداری رتبه‌بندی، تحلیل حساسیت بر روی پارامتر توافق ویکور (v) انجام شد. با استفاده از مقادیر $S(Crisp)$ و $R(Crisp)$ زیر نمونه دوازده‌موردی (پیوست ۳)، مقدار Q برای پنج سطح $v \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ محاسبه شد. نتایج نشان داد چهار حالت خرابی FM^3 ، FM^4 ، FM^{15} و FM^{16} در تمامی مقادیر v به‌طور پیوسته در رتبه‌های ۱ تا ۴ زیر نمونه قرار دارند؛ تنها جابه‌جایی مشاهده‌شده، تغییر رتبه‌های داخلی این چهار مورد با یکدیگر است (FM^{16} در $v = 0$ رتبه ۱ و FM^4 در $v \geq 0.75$ رتبه ۱ می‌گیرد). مهم‌تر اینکه، رتبه‌بندی هشت حالت خرابی باقی‌مانده (FM^{13} ، FM^{18} ، FM^6 ، FM^2 ، FM^1 ، FM^5 ، FM^{14} و FM^{17}) در تمامی پنج مقدار v کاملاً بدون تغییر است. این یافته، استحکام نتایج اولویت‌بندی — به‌ویژه برای حالات با ریسک بالا — را نسبت به انتخاب پارامتر توافق ویکور تأیید می‌کند.

جدول ۹. تحلیل حساسیت پارامتر توافق ویکور (v) برای زیر نمونه ۱۲ حالت خرابی

رتبه	ثبات	$1v=$	$7/0.7=$ ۵	$7/0.7=$ ۵	$2/0.7=$ ۵	$2/0.7=$ ۵	$0.7v=$	R(Crisp)	S(Crisp)	حالت بالقوه شکست	کد			
رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه	رتبه			
۲±	۴	۰,۳۸۵۱	۴	۰,۲۹۱۷	۴	۰,۱۹۸۲	۴	۰,۱۰۴۸	۲	۰,۰۱۱۴	۰,۰۸۷	۰,۲۱۸	FM ۳	ریختن مواد اولیه
۳±	۱	۰,۰۰۰۰	۱	۰,۰۲۲۷	۲	۰,۰۴۵۵	۲	۰,۰۶۸۲	۴	۰,۰۹۰۹	۰,۰۹۴	۰,۰۹۹	FM ۴	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه
۲±	۲	۰,۰۳۵۶	۲	۰,۰۳۵۲	۱	۰,۰۳۴۸	۱	۰,۰۳۴۵	۳	۰,۰۳۴۱	۰,۰۸۹	۰,۱۱۰	FM ۶۵	مقاومت کشش کم

	Stopper Bearing													
FM ۶۶	عدم آب بندی مناسب گردگیر	۰,۱۸۴	۰,۰۸۶	۰,۰۰۰	۱	۰,۰۶۸۸	۳	۰,۱۳۷۵	۳	۰,۲۰۶۳	۳	۰,۲۷۵۱	۳	۲±
FM ۶۳	عدم استحکام پیچشی کافی	۰,۲۲۳	۰,۰۹۸	۰,۱۳۶۴	۵	۰,۲۰۲۶	۵	۰,۲۶۸۸	۵	۰,۳۳۵۱	۵	۰,۴۰۱۳	۵	✓
FM ۶۸	عدم دسترسی/مفقودی در بسته بندی	۰,۲۷۱	۰,۱۳۰	۰,۵۰۰	۶	۰,۵۱۴۲	۶	۰,۵۲۸۳	۶	۰,۵۴۲۵	۶	۰,۵۵۶۶	۶	✓
FM ۶	خواص مکانیکی نامطلوب	۰,۲۹۳	۰,۱۳۱	۰,۵۱۱۴	۷	۰,۵۴۰۵	۷	۰,۵۶۹۶	۷	۰,۵۹۸۷	۷	۰,۶۲۷۸	۷	✓
FM ۲	شناسایی اشتباه مواد اولیه	۰,۳۱۷	۰,۱۴۲	۰,۶۳۶۴	۸	۰,۶۵۳۶	۸	۰,۶۷۰۹	۸	۰,۶۸۸۲	۸	۰,۷۰۵۵	۸	✓
FM ۱	ضرب خوردگی مواد اولیه	۰,۳۲۹	۰,۱۴۴	۰,۶۵۹۱	۹	۰,۶۸۰۴	۹	۰,۷۰۱۷	۹	۰,۷۲۳۰	۹	۰,۷۴۴۳	۹	✓
FM ۵	جنس نامناسب مواد اولیه	۰,۳۴۹	۰,۱۴۶	۰,۶۸۱۸	۱۰	۰,۷۱۳۶	۱۰	۰,۷۴۵۴	۱۰	۰,۷۷۷۳	۱۰	۰,۸۰۹۱	۱۰	✓
FM ۶۴	عدم کشش گردگیر	۰,۳۵۵	۰,۱۵۱	۰,۷۳۸۶	۱۱	۰,۷۶۱۱	۱۱	۰,۷۸۳۶	۱۱	۰,۸۰۶۰	۱۱	۰,۸۲۸۵	۱۱	✓
FM ۶۷	آسیب دیدگی سطحی در بسته بندی	۰,۴۰۸	۰,۱۷۴	۱,۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	✓

* ردیف‌های سبز رنگ: چهار اولویت برتر که در همه مقادیر V پایدار ماندند. ثبات $\checkmark$ = رتبه کاملاً بدون تغییر در تمام V ها. S = *S. ۰۹۹/۰ (۴FM)؛ S = °S ۴۰۸/۰ (۶۷FM)؛ R = *R. ۰۸۶/۰ (۶۶FM)؛ R = °R ۱۷۴/۰ (۶۷FM). نرمال‌سازی در سطح زیر نمونه انجام شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

شناسایی و اولویت‌بندی حالت‌های خرابی در فرآیندهای تولید، به‌ویژه در صنایعی که ایمنی و قابلیت اطمینان از اهمیت بالایی برخوردارند، امری حیاتی است. این پژوهش با هدف ارتقای فرآیند تصمیم‌گیری در مواجهه با شکست‌های احتمالی، با تلفیق روش تحلیل حالات شکست و اثرات با تکنیک‌های بهترین-بدترین فازی و ویکور فازی صورت پذیرفت.

در پاسخ به سوال اصلی پژوهش، نتایج نشان داد شناسایی و اولویت‌بندی حالت‌های شکست در صنعت قطعه‌سازی خودرو از طریق ترکیب سه مرحله - غربالگری دلفی، وزن‌دهی بهترین-بدترین فازی، و رتبه‌بندی ویکور فازی - به‌طور مؤثر امکان‌پذیر است. در پاسخ به سوالات فرعی: نخست، شاخص‌های نهایی حالت‌های شکست عبارت بودند از شدت، وقوع، تشخیص و هزینه؛ شاخص «زمان» در دور اول دلفی به دلیل کسب میانگین کمتر از آستانه حذف شد. دوم، وزن این شاخص‌ها به‌ترتیب ۰,۴۰۸ (شدت)، ۰,۲۶۵ (هزینه)، ۰,۱۸۶ (وقوع) و ۰,۱۳۹ (تشخیص) بود، با نرخ ناسازگاری حدود ۰,۰۶۴ که سازگاری بالای قضاوت‌های خبرگان را تأیید کرد. سوم، از ۷۱ حالت بالقوه شکست شناسایی شده، ۶۸ مورد پس از غربالگری دلفی باقی ماند. چهارم، رتبه‌بندی نهایی نشان داد عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION، مقاومت کشش کم Stopper Bearing، و دفرمگی هزارخار، بالاترین اولویت ریسک را دارند. پنجم، برای ده اولویت برتر، پیشنهاد‌های پیشگیرانه و تشخیصی مشخصی ارائه شد (جدول ۱۰).

مجموعه پلوس به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین اجزای سیستم انتقال قدرت خودرو، از حساسیت ویژه‌ای در قبال ایمنی برخوردار است. بر اساس نظر خبرگان، شاخص شدت - که میزان تأثیر خرابی بر مشتری را بازتاب می‌دهد - مهم‌ترین عامل در ارزیابی حالات خرابی این

مجموعه شناخته شد. جدول ۸، اقدامات پیشگیرانه و تشخیصی را برای ده اولویت برتر حالات بالقوه خرابی، بر اساس مستندات شرکت و مصاحبه با خبرگان، ارائه می‌دهد. برای اولویت دوم (مقاومت کشش کم Stopper Bearing)، علاوه بر اجرای تحلیل سیستم اندازه‌گیری و تست کشش دوره‌ای، اقدام تکمیلی «بازرسی ۱۰۰٪ تا اثبات پایداری فرآیند ($Cpk \geq 1.33$) و سپس بازنگری فرکانس بر اساس کنترل آماری فرآیند» پیشنهاد شد تا شدت کنترلی آن متناسب با رتبه بحرانی‌بودنش (رتبه دوم از شصت‌وهشت) باشد.

جدول ۱۰. پیشنهادات

رتبه	حالت خرابی	کنترل پیشگیری	کنترل تشخیصی	اقدامات پیشنهادی
۱	عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION	کنترل نیروی پرس به صورت ۱۰۰٪ با نمایشگر و لودسل	کنترل نیروی پرس به صورت ۱۰۰٪ با نمایشگر و لودسل	—
۲	مقاومت کشش کم Stopper Bearing	اجرای MSA	تست کشش به ازای هر ۲۰۰۰۰ عدد، یک نمونه	بازرسی ۱۰۰٪ تست کشش تا اثبات پایداری فرآیند ($Cpk \geq 1.33$) سپس بازنگری فرکانس بر اساس کنترل آماری فرآیند (SPC)
۳	دفرمگی هزارخار	اجرای MSA	کنترل توسط گیج	—
۴	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه	کالیبراسیون ابزار اندازه‌گیری	استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری استاندارد	آموزش نقشه‌قطعات جدید به بازرس کنترل
۵	برخورد شافت با لبه Boot و خراشیدگی عمقی با پارگی	—	بازرسی ۱۰۰٪ ظاهری-چشمی توسط اپراتور تولید و بازرس کیفیت	—
۶	قرارگیری ناصحیح TRUNNION در مونتاژ خار روی	کنترل فشار باد سالن در ابتدای شیفت	کنترل ۱۰۰٪ با استفاده از عکس مونتاژ صحیح (QSW-EN-۱۴۴)	—

			اسپایدر CIRCLIP	
۷	عدم آب‌بندی مناسب گردگیر	اجرای MSA	تست آب‌بندی گردگیر به ازای هر ۲۰۰۰۰ عدد، یک نمونه	—
۸	وجود آب در گریس	کنترل Air Drier توسط ارشد خط	—	نصب و اصلاح عملکرد Air Drier
۹	عدم مونتاژ صحیح O/R در شفت	کنترل نیروی پرس ۱۰۰٪ با نمایشگر	کنترل ۱۰۰٪ با عکس مونتاژ صحیح (QSW-EN-۱۴۵) و تست کشش	—
۱۰	ریختن مواد اولیه	رعایت دستورالعمل QSW-PL_۱۶/A	بررسی مهارت راننده	—

محدودیت‌ها و پیشنهادهای پژوهش‌های آتی

این پژوهش با چند محدودیت همراه است. نخست، تمرکز نسبی پانل خبرگان بر واحدهای مهندسی و تحقیق و توسعه - هرچند بازتاب طبیعی تمرکز دانش فنی محصول پلوس در این واحدهاست - ممکن است دیدگاه واحدهای دیگر را کم‌رنگ‌تر کرده باشد. دوم، در پژوهش حاضر نظرات پانزده خبره با وزن یکسان و از طریق میانگین هندسی/حسابی تجميع شد (رویکرد همگن‌سازی)، در حالی که سطح صلاحیت و تجربه خبرگان یکسان نیست. به‌عنوان پیشنهاد مشخص برای پژوهش‌های آتی، خبرگان می‌توانند پیش از مرحله بهترین-بدترین فازی، با الگوریتم **K-means** به سه یا چهار طبقه صلاحیتی خوشه‌بندی شوند و به هر طبقه وزن متفاوتی بر اساس معیارهای صلاحیت (مانند سابقه کار و سطح تحصیلات) تخصیص یابد - رویکردی که آموزاد مهدی‌راجی و همکاران (Amoozad Mahdiraji et al., ۲۰۲۲) با ترکیب دلفی، بهترین-بدترین فازی، **K-means** و کوپراس فازی در صنعت خودرو ایران به کار برده و نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه داده‌اند؛ این رویکرد در پژوهش حاضر به دلیل عدم نگهداری داده خام پاسخ تک‌تک خبرگان به شکلی که امکان بازخوشه‌بندی را فراهم کند، اجرا نشد. سوم، مقایسه با **RPN** سنتی و تحلیل حساسیت در

این پژوهش بر روی زیرنمونه‌ای از حالت‌های خرابی انجام شد؛ تکرار این تحلیل‌ها بر روی ماتریس تصمیم کامل و نیز مقایسه با روش‌های جایگزین مانند تاپسیس فازی، مسیر روشنی برای پژوهش‌های آینده است. در نهایت، یافته‌های این پژوهش به فرآیند تولید مجموعه پلوس در یک شرکت خاص محدود است؛ تکرار این چارچوب در سایر خطوط تولید و سایر شرکت‌های قطعه‌سازی، به تعمیم‌پذیری بیشتر یافته‌ها یاری خواهد رساند.

تعارض منافع

این مقاله فاقد تعارض منافع است.

سپاسگزاری

از تمامی مدیران و کارشناسان شرکت قطعات محوری که در این پژوهش یاری‌رسان بوده‌اند، صمیمانه سپاسگزاریم.

RCID

Mostafa Kazemi  <https://orcid.org/0000-0002-5084-5752>

Saba Seyrani  <https://orcid.org/0009-0008-2943-1142>

Zahra Naji Azimi  <https://orcid.org/0000-0003-1583-7244>

پیوست ۱. خروجی BWM فازی در نرم افزار لینگو

Variable	Value	Reduced Cost
Z	0.4266539	0.4289651E-07
L1	0.3797238	0.3671930E-07
U2	0.2246427	-0.1460905E-06
M1	0.4138862	0.000000
M2	0.1878444	0.000000
U1	0.4138862	0.000000
L2	0.1379285	0.3671930E-07
U3	0.1552646	0.3671930E-07
M3	0.1399373	0.000000
L3	0.1187740	-0.9045234E-07
U4	0.2925814	0.3671930E-07
M4	0.2694279	0.000000
L4	0.2208398	0.3671930E-07

پیوست ۲. ماتریس تصمیم نرمال ویکور فازی

	شدت	وقوع	تشخیص	هزینه
FM ^۱	-) ۰,۰۶۷۰,۳۳۳۰,۷۳ (۳	-) ۰,۲۴۶۰,۲۴۶۰,۷۳ (۸	-) (۰,۱۵۷۰,۲۷۱۰,۷ (۱۳	۰,۰۱۳۰,۴۱۳۰,۸) (۱۳
FM ^۲	-) ۰,۱۸۷۰,۲۱۳۰,۶۱ (۳	-) ۰,۲۶۲۰,۲۳۰,۷۲۱ (	-) (۰,۱۰,۳۲۹۰,۷۵۷ (۳۳	۰,۱۳۳۰,۵۳۳۰,۹) (۳۳
FM ^۳	-) ۰,۲۶۷۰,۱۳۳۰,۵۲ (	-) ۰,۲۹۵۰,۱۹۷۰,۶۸ (۹	۰,۰۱۴۰,۴۴۳۰,۸) (۷۱	-) ۰,۱۴۷۰,۲۵۳۰,۶۵ (۳

FM ^۴	-) ۰,۱۸۷,۰,۲۱۳,۰,۶۱ (۳	-) ۰,۴۹۲,۰,۰,۴۹۲-) (۴	-) ۰,۳۴۳,۰,۰,۸۶,۰,۵۱ (۴	-) ۰,۴,۰,۰,۴-) (۴
FM ^۵	-) ۰,۰۵۳,۰,۳۴۷,۰,۷۴ (۷	-) ۰,۱۹۷,۰,۲۹۵,۰,۷۸ (۷	-) ۰,۰۷۱,۰,۳۵۷,۰,۷۸ (۶	-) ۰,۰۱۳,۰,۳۸۷,۰,۷۸ (۷
FM ^۶	-) ۰,۲۵۳,۰,۱۴۷,۰,۵۴ (۷	-) ۰,۱۳۱,۰,۳۶۱,۰,۸۵ (۲	-) ۰,۱۷۱,۰,۲۵۷,۰,۶۸ (۶	-) ۰,۰۹۳,۰,۴۹۳,۰,۸۱ (۹۳
...	...	...	...	...
FM ^۶ _۳	-) ۰,۲۴,۰,۱۶,۰,۵۶-) (۱	-) ۰,۰۳۳,۰,۴۵۹,۰,۹۵ (۱	-) ۰,۲۱۴,۰,۲۱۴,۰,۶۴ (۳	-) ۰,۲۴,۰,۱۶,۰,۵۶-) (۱
FM ^۶ _۴	-) ۰,۰۴,۰,۳۶,۰,۷۶-) (	-) ۰,۲۳,۰,۲۶۲,۰,۷۵۴ (	-) ۰,۰۴۳,۰,۳۸۶,۰,۸۱ (۴	-) ۰,۰,۰,۴,۰,۸۱ (۴
FM ^۶ _۵	-) ۰,۲,۰,۲,۰,۶-) (۷	-) ۰,۴۲۶,۰,۰,۶۶,۰,۵۵ (۷	-) ۰,۳۸۶,۰,۰,۴۳,۰,۴۷ (۱	-) ۰,۳۶,۰,۰,۴,۰,۴۴-) (۱
FM ^۶ _۶	-) ۰,۳۶,۰,۰,۴,۰,۴۴-) (۱	-) ۰,۰۳۳,۰,۴۵۹,۰,۹۵ (۱	-) ۰,۲۱۴,۰,۲۱۴,۰,۶۴ (۳	-) ۰,۲,۰,۲,۰,۶-) (۱

FM ^۷ _۷	(۰,۰,۴۰,۸)	-) ۰,۲۳۰,۲۶۲,۰,۷۵۴ (	-) ۰,۰۸۶,۰,۳۴۳,۰,۷۷ (۱	(۰,۱۶,۰,۵۶,۰,۹۶)
FM ^۷ _۸	(۰,۱۲,۰,۲۸,۰,۶۸-)	-) ۰,۲۷۹,۰,۲۱۳,۰,۷۰ (۵	(۰,۴۲۹,۰,۰,۴۲۹-)	(۰,۰۴,۰,۴۴,۰,۸۴)

پیوست ۳. سودمندی، تاسف و شاخص ویکور گزینه‌ها

گزینه	S	R	Q	S(Crisp)	R(Crisp)	Q(Crisp)
FM ^۱	-) ۰,۰۹۱,۰,۳۲۹,۰,۷۴۹ (	-) ۰,۰۰۴,۰,۱۳۶,۰,۲۹۹ (	-) ۰,۴۱۳,۰,۱۶۵,۰,۸۰۵ (	۰,۳۲۹	۰,۱۴۴	۰,۱۸۱
FM ^۲	-) ۰,۱۰۴,۰,۳۱۷,۰,۷۳۷ (	-) (۰,۰۳۵,۰,۱۴۱,۰,۲۵)	-) ۰,۳۸۴,۰,۱۶۶,۰,۷۴۸ (	۰,۳۱۷	۰,۱۴۲	۰,۱۷۴
FM ^۳	-) (۰,۲۰۱,۰,۲۲,۰,۶۳۵	-) ۰,۰۰۲,۰,۰۶۷,۰,۲۱۲ (	-) ۰,۴۵۸,۰,۰۴۸,۰,۶۶۶ (	۰,۲۱۸	۰,۰۸۷	۰,۰۷۶
FM ^۴	-) ۰,۳۲۱,۰,۰۹۹,۰,۵۱۹ (	-) (۰,۰۴۸,۰,۰۸۷,۰,۲۵	-) ۰,۵۵۹,۰,۰۲۲,۰,۶۶۲ (	۰,۰۹۹	۰,۰۹۴	۰,۰۳۶
FM ^۵	-) ۰,۰۷۲,۰,۳۴۹,۰,۷ (۶۹	-) ۰,۰۰۴,۰,۱۴۲,۰,۳۰ (۵	-) ۰,۴۱۳,۰,۱۷۹,۰,۸ (۱۹	۰,۳۴۹	۰,۱۴۶	۰,۱۹۱
FM ^۶	-) ۰,۱۲۷,۰,۲۹۳,۰,۷ (۱۴	-) ۰,۰۲۵,۰,۱۳۱,۰,۲ (۳۷	-) ۰,۴۰۵,۰,۱۴۵,۰,۷ (۲۴	۰,۲۹۳	۰,۱۳۱	۰,۱۵۲

...	...	...	...	...	...	...
FM ^۶ _۳	-) ۰/۱۹۷'۰/۲۲۳'۰/۶ (۴۳)	-) ۰/۰۰۶'۰/۰۸۵'۰/۲۲ (۹)	-) ۰/۴۶۶'۰/۰۶۹'۰/۶ (۸۷)	۰/۲۲۳	۰/۰۹۸	۰/۰۹۰
FM ^۶ _۴	-) ۰/۰۶۵'۰/۳۵۵'۰/۷ (۷۶)	(۰'۰/۱۴۷'۰/۳۱)	-) ۰/۴۰۷'۰/۱۸۷'۰/۸ (۲۸)	۰/۳۵۵	۰/۱۵۱	۰/۱۹۹
FM ^۶ _۵	-) (۰/۳۱'۰/۱۱'۰/۵۳۱)	-) ۰/۰۵۴'۰/۰۸۲'۰/۲۴ (۵)	-) (۰/۵۶۱'۰/۰۲'۰/۶۶)	۰/۱۱۰	۰/۰۸۹	۰/۰۳۵
FM ^۶ _۶	-) ۰/۲۳۶'۰/۱۸۴'۰/۶ (۰۵)	-) ۰/۰۰۶'۰/۰۸۵'۰/۱۸ (	-) ۰/۴۸۱'۰/۰۵۳'۰/۶ (۱۹)	۰/۱۸۴	۰/۰۸۶	۰/۰۶۱
FM ^۶ _۷	-) ۰/۰۱۲'۰/۴۰۸'۰/۸ (۲۸)	۰/۰۴۲'۰/۱۶۳'۰/۳ (۲۷)	-) ۰/۳۴'۰/۲۲۶'۰/۸۶ (۶)	۰/۴۰۸	۰/۱۷۴	۰/۲۴۴
FM ^۶ _۸	-) ۰/۱۵'۰/۲۷۱'۰/۶۹ (۱)	۰/۰۱۱'۰/۱۱۷'۰/۲ (۷۸)	-) ۰/۴۲۹'۰/۱۲۱'۰/۷ (۵۹)	۰/۲۷۱	۰/۱۳۰	۰/۱۴۳

پیوست ۴. اولویت‌بندی نهایی حالت‌های شکست

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۱	۰,۰۱۹۵	FM ۳۲	عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION
۲	۰,۰۳۴۹	FM ۶۵	مقاومت کشش کم Stopper Bearing
۳	۰,۰۳۵۲	FM ۵۶	دفرمگی هزارخار
۴	۰,۰۳۶۴	FM ۴	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه
۵	۰,۰۴۶۸	FM ۱۳	برخورد شافت با لبه boot و خراشیدگی عمقی با پارگی
۶	۰,۰۴۸۵	FM ۲۷	قرارگیری ناصحیح TRUNNION در مونتاژ خار روی اسپایدر CIRCLIP

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۷	۰,۰۶۱۳	FM ۶۶	عدم آبیندی مناسب گردگیر
۸	۰,۰۷۰۸	FM ۳۹	وجود آب در گریس
۹	۰,۰۷۵۵	FM ۳۰	عدم مونتاژ صحیح شفت در O/R
۱۰	۰,۰۷۵۹	FM ۳	ریختن مواد اولیه
۱۱	۰,۰۷۷۳	FM ۴۹	بیرون زدن گردگیر در فرآیند جازدن گردگیر روی هوزینگ
۱۲	۰,۰۸۱۹	FM ۵۵	دفرمگی رزوه
۱۳	۰,۰۸۴۳	FM ۲۱	نبود سوراخ اشپیل در مونتاژ BJ/H
۱۴	۰,۰۸۴۷	FM ۲۵	نبودن Retainer
۱۵	۰,۰۸۹۷	FM ۶۳	عدم استحکام پیچشی کافی
۱۶	۰,۰۹۰۰	FM ۲۰	کم بودن تعداد ساچمه‌ها در مونتاژ BJ/H
۱۷	۰,۰۹۰۶	FM ۹	شناسایی اشتباه مواد
۱۸	۰,۰۹۴۴	FM ۶۲	عدم مقاومت پیچشی دینامیکی
۱۹	۰,۱۰۰۰	FM ۵۹	عدم وجود حک و سریال در کنترل نهایی
۲۰	۰,۱۰۲۴	FM ۴۸	عدم قرار گیری مناسب پولک و فنر در مونتاژ گردگیر و پولک
۲۱	۰,۱۰۷۲	FM ۳۷	عدم وجود اسفريکال رولر
۲۲	۰,۱۱۴۲	FM ۴۲	در آمدن بلبرینگ در پرس بوش بلبرینگ
۲۳	۰,۱۲۱۷	FM ۲۴	کم بودن نیدل در دوباره کاری مونتاژ اسپایدر
۲۴	۰,۱۳۰۴	FM ۱۴	جا نخوردن boot در محل خود

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۲۵	۰,۱۳۱۰	FM ۱۶	جا نخوردن BJ-SHAFT CIRCLIP
۲۶	۰,۱۳۳۷	FM ۲۲	جدا شدن ABS
۲۷	۰,۱۴۰۳	FM ۳۴	تزریق ناصحیح گریس (بیرون زدن گریس) در تزریق گریس داخل BOOT BJ
۲۸	۰,۱۴۳۱	FM ۶۸	عدم دسترسی سریع و یا مفقودی در فرآیند بسته‌بندی
۲۹	۰,۱۴۸۸	FM ۲۹	عدم مونتاژ صحیح RING SNAP
۳۰	۰,۱۴۹۲	FM ۳۶	زیاد بودن گریس تزریقی
۳۱	۰,۱۵۲۲	FM ۶۱	لقی مجموعه پلوس
۳۲	۰,۱۵۲۴	FM ۱۸	زیاد بودن وزن گریس در مونتاژ BJ/H
۳۳	۰,۱۵۲۵	FM ۶	خواص مکانیکی نامطلوب
۳۴	۰,۱۵۴۲	FM ۴۳	استفاده از هوزینگ نامناسب
۳۵	۰,۱۵۸۱	FM ۴۶	تزریق نامناسب گریس در مونتاژ گردگیر و پولک
۳۶	۰,۱۶۳۳	FM ۵۱	قرار نگرفتن بست در شیار گردگیر در فرآیند بستن large band BJ
۳۷	۰,۱۶۹۷	FM ۳۸	بیرون زدن گریس از زیر BOOT
۳۸	۰,۱۷۴۰	FM ۲	شناسایی اشتباه مواد اولیه
۳۹	۰,۱۷۸۰	FM ۴۰	وجود فاصله بین بوش و بلبرینگ در پرس بوش بلبرینگ
۴۰	۰,۱۷۸۷	FM ۵۷	عدم بسته بودن BJ بند
۴۱	۰,۱۸۰۷	FM ۱	ضرب خوردگی مواد اولیه

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۴۲	۰,۱۹۰۲	FM ۷	کثیفی و زنگ زدگی مواد اولیه
۴۳	۰,۱۹۰۸	FM ۵	جنس نامناسب مواد اولیه
۴۴	۰,۱۹۱۱	FM ۲۳	کم بودن تعداد نیدل‌ها در مونتاژ اسپایدر
۴۵	۰,۱۹۶۰	FM ۴۴	افتادن فنر به صورت افقی در دوباره کاری پرس بوش بلبرینگ
۴۶	۰,۱۹۸۹	FM ۶۴	عدم کشش گردگیر
۴۷	۰,۲۰۱۵	FM ۳۳	کم بودن وزن گریس در تزریق گریس داخل BOOT BJ
۴۸	۰,۲۱۰۶	FM ۵۸	عدم بسته بودن TJ بند
۴۹	۰,۲۱۶۱	FM ۵۰	قرار نگرفتن بست در شیار گردگیر در فرآیند بستن large band TJ
۵۰	۰,۲۱۶۳	FM ۴۱	تنظیم نبودن فاصله بلبرینگ تا انتهای شفت در پرس بوش بلبرینگ
۵۱	۰,۲۱۷۷	FM ۴۷	قرار نگرفتن خار در شیار هوزینگ در مونتاژ گردگیر و پولک
۵۲	۰,۲۲۱۷	FM ۱۷	کم بودن وزن گریس در مونتاژ BJ/H
۵۳	۰,۲۲۲۹	FM ۶۰	کم بودن وزن پلوس
۵۴	۰,۲۲۳۷	FM ۳۱	خرابی رزوه Outer race
۵۵	۰,۲۲۶۱	FM ۱۵	باز بودن دهانه بست در مونتاژ CIRCLIP BJ بر روی شافت BJ/S و پرس بست
۵۶	۰,۲۲۶۳	FM ۱۹	روانی کم مجموعه در مونتاژ BJ/H
۵۷	۰,۲۲۶۳	FM ۴۵	افتادن cap از روی فنر در دوباره کاری پرس بوش بلبرینگ
۵۸	۰,۲۳۲۳	FM ۱۱	جابجا خوردن مونتاژ گردگیرها و بست‌ها

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۵۹	۰,۲۳۸۵	FM ۲۶	نگذاشتن Trunnion Circlip
۶۰	۰,۲۴۴۰	FM ۱۰	ریختن مواد در انتقال
۶۱	۰,۲۴۴۴	FM ۶۷	آسیب دیدگی سطحی قطعه در مرحله بسته بندی
۶۲	۰,۲۵۹۳	FM ۵۳	خوانا نبودن حک در مرحله برچسب زنی
۶۳	۰,۲۶۷۸	FM ۳۵	سفت بودن گریس
۶۴	۰,۳۳۶۹	FM ۲۸	جا نخوردن صحیح فنر و پولک
۶۵	۰,۳۴۹۴	FM ۵۴	حک در محل نامناسب
۶۶	۰,۳۵۱۹	FM ۵۲	عدم وضوح بارکد ردیابی در مرحله برچسب زنی
۶۷	۰,۳۵۵۱	FM ۱۲	برخورد شافت با لبه boot و خراشیدگی سطحی
۶۸	۰,۳۵۹۴	FM ۸	ظاهر نامناسب مواد اولیه

منابع

- رشیدی، م.، موغلی، ع.، و رسولی، ر. (۱۳۹۳). طراحی مدل تقویت ماندگاری سازمانی کارکنان دانش‌پایه: با استفاده از فن دلفی مشاوره شغلی و سازمانی، ۶(۲۱)، ۹۹۳-۹۹۳۷۳.
- روانستان، ک.، آقاجانی، ح.، صفایی قادیکلایی، ع.، و یحیی‌زاده‌فر، م. (۱۳۹۶). تعیین و وزن‌دهی استراتژی‌های تاب‌آوری در زنجیره تأمین ایران خودرو. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۷(۱)، ۱۴۵-۱۷۲.
- صیامیان، ن.، نصیراحمدی، ک.، و احسانی امرئی، ر. (۱۴۰۰). ارزیابی ریسک بهداشت، ایمنی و محیط زیست در صنعت خودروسازی براساس روش FTA و FMEA. پژوهش و فناوری محیط زیست، ۵(۸)، ۱۳۹-۱۵۹. <https://www.magiran.com/p۲۲۹۵۸۵۳>
- مشایخی، ع.، فرهنگی، ع.، مؤمنی، م.، و علیدوستی، س. (۱۴۰۰). بررسی عوامل کلیدی مؤثر بر کاربرد فناوری اطلاعات در سازمان‌های دولتی ایران: کاربرد روش دلفی. پژوهش‌های مدیریت در ایران، ۹(۲۰)، ۱۹۱-۲۳۹.
- معصومی‌بیگی، ح.، مطلبی پیکانی، د.، غنی‌زاده، ق.، اکبری جور، ح.، و اسمعیلی، م. (۱۴۰۲). شناسایی و ارزیابی خطر در یک صنعت باتری‌سازی به روش FMEA و برآورد نسبت هزینه رخداد حوادث به پیشگیری نشریه سلامت و محیط زیست، ۱۶(۴)، ۷۸۷-۸۰۴. <https://www.magiran.com/p۲۶۹۸۹۶۵>

References

- Akbar, M. A., Naseem, A., Ahmad, Y., & Zaman, U. K. uz. (۲۰۲۴). Production risk analysis and prioritization in manufacturing industry. *Ain Shams Engineering Journal*, ۱۵(۷), ۱۰۲۷۵۶. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102756>
- Akkus, O. (۲۰۲۴). A novel method for weighting decision makers for FMEA under intuitionistic fuzzy environment. *Quality and Reliability Engineering International*, ۴۰(۵), ۱۵۶۶-۱۵۹۲. <https://doi.org/10.1002/qre.3510>
- Amoozad Mahdiraji, H., Hafeez, K., Kord, H., & Abbasi Kamardi, A. A. (۲۰۲۲). Analysing the voice of customers by a hybrid fuzzy decision-making approach. *Management Decision*, ۶۰(۲), ۳۹۹-۴۲۵. <https://doi.org/10.1108/MD-01-2020-0017>
- Baghery, M., Yousefi, S., & Rezaee, M. J. (۲۰۱۸). Risk measurement and prioritization of auto parts manufacturing processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, ۲۹(۸), ۱۸۰۳-۱۸۲۵. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1226-0>

- Baloch, A. U., & Mohammadian, H. (۲۰۱۶). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy VIKOR and Data Envelopment Analysis-based fuzzy AHP. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, ۲(۸), ۲۳-۳۰. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2016.08.005>
- Baynal, K., Sari, T., & Akpinar, B. (۲۰۱۸). Risk management in automotive manufacturing process based on FMEA and grey relational analysis. *Advances in Production Engineering & Management*, ۱۲(۱), ۶۹-۸۰. <https://doi.org/10.14743/apem2018.1.273>
- Chang, K. H., Chang, Y.-C., & Lee, Y.-T. (۲۰۱۴). Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, ۱۲(۶), ۱۲۲۹-۱۲۵۷. <https://doi.org/10.1142/S0196722014500631>
- Charan, K. V., Singh, M., Redhu, S., & Soni, G. (۲۰۲۶). A framework for automating failure modes and effects analysis (FMEA) using large language models (LLMs) and retrieval-augmented generation (RAG). *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, ۱۷, ۱۴۹۵-۱۵۰۹. <https://doi.org/10.1007/s13198-026-03171-6>
- Chen, S.-H., & Hsieh, C.-H. (۱۹۹۹). Graded mean integration representation of generalized fuzzy number. *Journal of Chinese Fuzzy Systems*, ۲(۲), ۱-۷.
- Fan, J., Zhu, Q., & Wu, M. (۲۰۲۴). Failure mode and effect analysis using VIKOR method based on interval-valued linguistic Z-numbers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, ۴۶(۱), ۱۱۸۳-۱۱۹۹. <https://doi.org/10.3233/JIFS-231527>
- Ghoushchi, S. J., Yousefi, S., & Khazaeili, M. (۲۰۱۹). An extended FMEA approach based on Z-MOORA and fuzzy BWM. *Applied Soft Computing*, ۸۱, ۱۰۵۵۰۵. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105505>
- Guo, S., & Zhao, H. (۲۰۱۷). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-Based Systems*, ۱۲۱, ۲۳-۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010>
- Kutlu, A. C., & Ekmekçioğlu, M. (۲۰۱۲). Fuzzy FMEA by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, ۳۹(۱), ۶۱-۶۷. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.06.121>
- Liou, J. J. H., Guo, B. H. T., Huang, S. W., & Yang, Y. T. (۲۰۲۴). FMEA using interval type-۲ fuzzy and multiple-criteria decision-making methods. *Mathematics*, ۱۲(۲۴), ۳۹۳۱. <https://doi.org/10.3390/math12243931>
- Liu, H.-C. (۲۰۱۶). FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. In *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*

- (pp. 13–27). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1466-6>
- Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in FMEA: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.069>
- McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2009). *The basics of FMEA* (3rd ed.). CRC Press.
- Mirzaei, S., & Avakhdarestani, S. (2016). Development of FMEA using fuzzy ANP. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 11(2), 213–228. <https://doi.org/10.1504/IJPMQ.2016.070016>
- Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 12983–12990. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.097>
- Patil, S. K., & Kant, R. (2014). A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking solutions of knowledge management adoption. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 679–693. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.028>
- Rezaee, M. J., Salimi, A., & Yousefi, S. (2017). Identifying and managing failures in the stone processing industry using cost-based FMEA. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9–12), 3329–3342. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0894-2>
- Rezaei, J. (2010). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 38, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.11.009>
- Sakthivel, G., & Ikua, B. W. (2017). FMEA using fuzzy AHP and GRA-TOPSIS. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 12(2), 466–484. <https://doi.org/10.1504/IJPMQ.2017.083049>
- Sakthivel, G., Saravanakumar, D., & Muthuramalingam, T. (2018). Application of FMEA in manufacturing industry with FAHP-fuzzy TOPSIS and FAHP-fuzzy VIKOR. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 12(3), 398–423. <https://doi.org/10.1504/IJPMQ.2018.090870>
- Sumasto, F., Nugroho, Y. A., Solih, E. S., Arohman, A. W., Agustin, D., & Permana, A. K. (2021). Enhancing quality control in the Indonesian automotive parts industry through FMEA and MSA. *Instrumentation Measure Métrologie*, 17(1), 43–53. <https://doi.org/10.18280/im.17.1.05>
- Tadić, D., Marinković, D., & Komatina, N. (2020). A novel IPF-AHP-FMEA approach for prioritizing failure modes in the automotive industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/1754806720961900>

- Tian, Z. P., Wang, J. Q., & Zhang, H. Y. (۲۰۱۸). An integrated approach for FMEA based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. *Applied Soft Computing*, ۷۲, ۶۳۶-۶۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.08.010>
- Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., & Bagheri, M. (۲۰۱۸). HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach. *Safety Science*, ۱۰۲, ۱۴۴-۱۵۸. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.010>
- Yucesan, M., Gul, M., & Celik, E. (۲۰۲۱). A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best-worst method. *Complex & Intelligent Systems*, ۷, ۱۵۴۷-۱۵۶۴. <https://doi.org/10.1007/s40447-021-00279-3>

[In Persian]

- Rashidi, M., Moghli, A., & Rasouli, R. (۲۰۱۴). Designing a model for enhancing the organizational retention of knowledge-based employees: Using the Delphi technique [In Persian]. *Journal of Career and Organizational Counseling*, ۶(۲۱), e۹۹۳۷۳.
- Ravanestan, K., Aghajani, H., Safaei Ghadikolaei, A., & Yahyazadehfar, M. (۲۰۱۷). Identifying and weighting resilience strategies in the Iran Khodro supply chain [In Persian]. *Industrial Management Perspective*, ۱(۱), ۱۴۵-۱۷۲.
- Seyamian, N., Nasirahmadi, K., & Ehsani Amraei, R. (۲۰۲۱). Health, safety, and environmental risk assessment in the automotive industry based on FTA and FMEA methods [In Persian]. *Journal of Environmental Research and Technology*, ۹(۸), ۱۳۹-۱۵۹. <https://www.magiran.com/p۲۲۹۵۸۵۳>
- Mashayekhi, A., Farhangi, A.-A., Momeni, M., & Alidousti, S. (۲۰۲۱). Investigating the key factors affecting the application of information technology in Iranian governmental organizations: Application of the Delphi method [In Persian]. *Iranian Management Research*, ۹(۲۰), ۱۹۱-۲۳۹.
- Masoumbeigi, H., Matlabi Pikani, D., Ghanizadeh, G., Akbari Jour, H., & Esmaeili, M. (۲۰۲۴). Hazard identification and assessment in a battery manufacturing industry using FMEA and estimating the cost ratio of accident occurrence to prevention [In Persian]. *Journal of Health and Environment*, ۱۶(۴), ۷۸۷-۸۰۴. <https://www.magiran.com/p۲۶۹۸۹۶۵>

استناد به این مقاله: نام خانوادگی نویسنده اول، نام. (سال). عنوان مقاله. عنوان نشریه (ایتالیک)، سال (شماره)، ص آغاز-ص پایان.



Name of Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ۴,۰ International License.