Industrial Management Studies
Vol. 24, No.81, 2026; P 145-179
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2026.92279.3024

ATU PRESS

Original Research
Accepted: 12/07/2026
Revised: 17/06/2026
Received: 19/04/2026
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

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, 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.

Introduction

The automotive parts manufacturing sector in Iran faces persistent challenges

* Corresponding Author: kazemi@um.ac.ir

How to Cite: Kazemi, M., Seyrani, S., Naji Azimi, Z. (2026). Failure Modes Identification and Prioritization Using the Fuzzy Best–Worst and Fuzzy VIKOR Approaches in the Automotive Parts Manufacturing Industry, *Industrial Management Studies, 24(81)*, 145-179.

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., 2009; Baghery et al., 2018). 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., 2013; Yousefi et al., 2018). Recent literature called for replacing RPN with fuzzy multi-criteria approaches (Liu, 2016; Akkus, 2024; Liou et al., 2024). This study integrated 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 had 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 3; termination required a Kendall's W change of less than 0.02 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, 1999) as standardized in Guo and Zhao (2017). The consistency ratio was computed as CR = k/CI. Seventy-one potential failure modes were reduced to 68 through three Delphi rounds. The 68 retained failure modes were evaluated using fuzzy linguistic scales (Patil & Kant, 2014) and ranked by FVIKOR (Opricovic, 2011) with compromise parameter v = 0.5, defuzzifying S, R, and Qusing (l + 2m + u) / 4. A sensitivity analysis across $v \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ and an illustrative RPN comparison were also conducted for a 12-FM subsample.

Findings

FBWM yielded weights of 0.408 (severity), 0.265 (cost), 0.186 (occurrence), and 0.139 (detection). The consistency ratio CR ≈ 0.064 confirmed high expert agreement. The "time" criterion was eliminated in Delphi round 1 (mean = 2.933). Three failure modes were eliminated in the failure-mode Delphi round 1. Cronbach's alpha was 0.91 (round 2) and 0.90 (round 3); Kendall's W was 0.247 (round 2) and 0.254 (round 3). FVIKOR ranked all 68 failure modes; the five highest-priority were: FM32—Insufficient tensile force in the trunnion test (Q = 0.0195); FM65—Low stopper bearing tensile strength (Q = 0.0349); FM56—

Spline deformation (Q = 0.0352); FM4—Dimensional non-conformance (Q = 0.0364); FM13—Shaft contact with boot edge (Q = 0.0468). The RPN comparison showed that failure modes with high detection difficulty but low severity (FM64, FM67) were over-ranked by the simple additive approach relative to FVIKOR. The sensitivity analysis demonstrated full robustness: {FM3, FM4, FM65, FM66} 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 confirmed that integrating Delphi screening, FBWM weighting, and FVIKOR ranking provided a robust approach to failure mode prioritization. The dominance of severity (weight = 0.408) reflected the safety-critical nature of the CV joint. FVIKOR's superiority over simple additive scoring was most apparent when criticality was concentrated in high-severity or high-cost criteria. The study extended existing literature as the first to simultaneously apply all three elements (Delphi, FBWM, FVIKOR) in Iranian automotive parts manufacturing, and provided empirical sensitivity validation and an RPN comparison. A key limitation was 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 identified and prioritized 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 ≈ 0.064) and robustness (full rank stability across all v values) confirmed 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. (2022).

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

مقاله پژوهشی
تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱
ISSN: 2251/8029
eISSN: 2476-602X

مطالعات مدیریت صنعتی
سال بیست و چهارم، شماره ۸۱، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۴۵ تا ۱۷۹
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2026.92279.3024

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 سِیرانی | 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 باهدف 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 ویکور فازی انجام شد. این پژوهش ازلحاظ هدف، کاربردی و ازنظر 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 تلرانس‌های 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.

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

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

* نویسنده مسئول: kazemi@um.ac.ir

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، باهدف شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی خرابی‌های بالقوه پیش از وقوع آن‌ها در طراحی یا فرآیند تولید به کار گرفته می‌شود (باقری، یوسفی و رضائی، ۲۰۱۸؛ McDermott, Mikulak, 2009 & Beauregard,). به‌کارگیری 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.

بااین‌حال، اولویت‌بندی سنتی حالت‌های شکست در FMEA۱ بر مبنای عدد اولویت ریسک-یعنی حاصل‌ضرب سه عامل شدت، وقوع و تشخیص- با کاستی‌های متعددی روبروست: ترکیب‌های عددی متفاوت از این سه عامل می‌توانند RPN۲ 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, 2013 & Liu, Liu؛ Baghery & Yousefi, Alizadeh, Hayati, ۲۰۱۸). مرورهای اخیر بر ادبیات این حوزه نیز همچنان بر ضرورت جایگزینی RPN با رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره۳ فازی تأکید می‌کنند (Liu, 2016؛ Akkus, 2024؛ Yang, 2024 & Liou, Guo, Huang).

در پاسخ به این کاستی‌ها، روش بهترین-بدترین۴ (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 فازی۵ (Zhao, 2017 & Guo)، عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های زبانی خبرگان را نیز پوشش می‌دهد. در ادامه فرآیند تصمیم‌گیری، روش ویکور فازی۶ (Opricovic, 2011) امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها (در اینجا، حالت‌های خرابی) را بر مبنای نزدیک‌ترین فاصله به راه‌حل توافقی فراهم می‌آورد. پژوهش‌های متعددی این دو روش را با FMEA ترکیب کرده‌اند؛ برای نمونه، تیان، وانگ و ژانگ (Zhang, 2018 & Tian, Wang) رویکردی تلفیقی از بهترین-بدترین فازی، آنتروپی نسبی و ویکور را برای FMEA پیشنهاد دادند، قوشچی، یوسفی و خزائیلی (Ghoushchi, Khazaeili, 2019 & Yousefi) با ترکیب بهترین-بدترین فازی و Z-MOORA، خرابی‌های صنعت

1 Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)
2 Risk Priority Number (RPN)
3 Multiple Criteria Decision-Making (MCDM)
4 Best-Worst Method (BWM)
5 Fuzzy Best-Worst Method (FBWM)
6 Fuzzy VIKOR (FVIKOR)

قطعات یدکی خودرو را اولویت‌بندی نمودند و یوسسان و همکاران (Celik, 2021 & Yucesan, Gul) 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: لئو و همکاران (Yang, 2024 & Liou, Guo, Huang) 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 (Komatina, 2025 & Tadić, Marinković) رویکرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی پایتاگورین را برای اولویت‌بندی خرابی‌ها در یک تأمین‌کننده صنعت خودرو به کار بردند؛ و چاران و همکاران (Singh, 2026 & Charan, Soni) 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.

باوجوداین حجم گسترده پژوهش، بررسی پیشینه (که در بخش بعد به‌تفصیل 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[1]- کمتر موردتوجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر باهدف 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 غربال‌شده، سپس وزن شاخص‌ها با روش بهترین-بدترین فازی محاسبه و درنهایت، رتبه‌بندی حالت‌های خرابی با روش ویکور فازی انجام می‌شود.

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 قابل‌ارائه است؟

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در داخل کشور، FMEA را در صنایع ایرانی به کار گرفته‌اند. روانستان و همکاران

1 Constant Velocity (CV) Joint

(۱۳۹۶) با ترکیب FMEA، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی۱ فازی و DANP فازی، استراتژی‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین ایران‌خودرو را وزن‌دهی و اولویت‌بندی نمودند. صیامیان و همکاران (۱۴۰۰) با تلفیق FMEA و تحلیل درخت خطا۲، 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,2012) 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, 2014) با TOPSIS-DEMATEL ریسک شکست را در یک شرکت متالورژی پودر فعال در تولید قطعات خودرو رتبه‌بندی نمودند؛ میرزایی و آوخ‌درستانی (Mirzaei & Avakhdarestani, 2016) با ترکیب اولویت فازی و فرآیند شبکه تحلیلی فازی، فرآیند رنگ‌آمیزی یک شرکت خودروسازی ایرانی را ارزیابی کردند؛ بلوچ و محمدیان (Baloch & Mohammadian, 2016) با ترکیب تحلیل پوششی داده‌ها، ویکور فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تولید رادیاتور خودرو را تحلیل کردند؛ ساکتیول و همکاران، در دو مطالعه (Ikua, 2017 & Sakthivel؛ Saravanakumar, & Sakthivel 2018)، 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, Akpinar, 2018 & Sari) با تحلیل رابطه خاکستری و FMEA، مشکلات خط مونتاژ یک شرکت خودروسازی ترکیه را بررسی کردند؛ یوسفی و همکاران (Baghery, & Yousefi, Alizadeh, Hayati 2018) 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, 2019) 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

1 Analytical Hierarchy Process (AHP)
2 Failure Tree Analysis (FTA)

همکاران (Zhang & Tian, Wang, 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., 2024) با تلفیق FMEA و تحلیل سیستم اندازه‌گیری، کنترل کیفیت صنعت قطعات خودرو اندونزی را ارتقا دادند؛ اکبر و همکاران (Akbar, Naseem, Ahmad & Zaman, 2024) با شبیه‌سازی مونت‌کارلو و دیمتل، ریسک فرآیندهای تولیدی را تحلیل و اولویت‌بندی کردند؛ لئو و همکاران (Liou, Guo, Huang & Yang, 2024) با اعداد فازی نوع دو ذوزنقه‌ای، بهترین-بدترین، دیمتل و میرکاس را ترکیب نمودند؛ فن و همکاران (Fan, Zhu & Wu, 2024) ویکور را با اعداد زبانی فازی بازه‌ای Z تلفیق کردند؛ آکوش (Akkus, 2024) بر وزن‌دهی تصمیم‌گیرندگان در محیط فازی شهودی تمرکز کرد؛ تادیچ و همکاران (Tadić, Marinković & Komatina, 2025) از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی پایتاگورین بازه‌ای برای اولویت‌بندی خرابی‌ها در یک تأمین کننده صنعت خودرو استفاده کردند؛ و چاران و همکاران (Charan, Soni & Singh, 2026) 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 Kamardi, 2022) 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)BWM	(F)VIKOR	مقایسه RPN	تحلیل حساسیت
Ghoushchi, & Yousefi Khazaeili (۲۰۱۹)	Z-FBWM – MOORA	قطعات یدکی خودرو	✗	✓	✗	✓	✗
Amoozad Mahdiraji et al. (۲۰۲۲)	Delphi – Fuzzy FBWM – K-means – FCOPRAS	خودرو ایران (صدای مشتری)	✓	✓	✗	✗	✗
Gul ,Yucesan & Celik (۲۰۲۱)	Bayesian Fuzzy Network – FBWM	عمومی	✗	✓	✗	✗	✗
et al Sumasto (۲۰۲۴)	MSA – FMEA	قطعات	✗	✗	✗	✗	✗

نویسندگان و سال	روش پیشنهادی	دلفی	(F)BWM	(F)VIKOR	مقایسه RPN	تحلیل حساسیت
			خودرو (اندونزی)			
Akbar, Naseem, & Ahmad Zaman (۲۰۲۴)	Carlo – Monte DEMATEL	✗	✗	✗	✗	✗
Guo, Liou, & Huang Yang (۲۰۲۴)	BWM – IT2TFN – DEMATEL – MAIRCA	✗	✓	✗	✓	✗
Fan, Zhu & Wu (۲۰۲۴)	– IVLZN VIKOR	✗	✗	✓	✗	✗
Akkus (۲۰۲۴)	Intuitionistic Fuzzy – MARCOS	✗	✗	✗	✗	✗
Tadić, & Marinković Komatina (۲۰۲۵)	Interval-Valued Pythagorean Fuzzy AHP – FMEA	✗	✗	✗	✓	✗
Charan, Soni & Singh (۲۰۲۶)	– FMEA LLM/RAG	✗	✗	✗	✗	✗
پژوهش حاضر (۱۴۰۳)	FBWM – دلفی FVIKOR -	✓	✓	✓	✓*	✓*

* 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., 2022) و ترکیب بهترین-بدترین فازی با ویکور (یا روش‌های مرتبط) نیز در مطالعاتی غیر از صنعت خودرو سابقه دارد (Tian et al., 2018)، 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 ازلحاظ هدف کاربردی و از منظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی و به شیوه پیمایشی انجام شد. داده‌های موردنیاز 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 به‌صورت 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 (Mahdiraji et al., 2022 Amoozad).

گام‌های اجرایی پژوهش به‌ترتیب 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 درنهایت (۵) اولویت‌بندی حالت‌های خرابی با روش ویکور فازی و ارائه پیشنهادهای پیشگیرانه و تشخیصی.

تیم خبرگان. با توجه به ماهیت پژوهش، تیم خبرگان به‌صورت 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 پانزده‌نفره به‌صورت 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 به‌عنوان 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	فوق‌لیسانس	مهندسی مکاترونیک- 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	فوق‌لیسانس	مکانیک- تبدیل انرژی	مدیر مهندسی	مهندسی و پژوهش و توسعه	۲۷
۶	لیسانس	فیزیک	مدیر کیفیت	کیفیت	۲۵
۷	فوق‌لیسانس	مکانیک- تبدیل انرژی	کارشناس تکوین محصول پلوس	مهندسی و پژوهش و توسعه	۱۲
۸	فوق‌لیسانس	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	فوق‌دیپلم	ماشین‌افزار	سرپرست مونتاژ پلوس	تولید	۲۲
۱۱	فوق‌لیسانس	مکانیک	رئیس فروش بازار یدک	فروش	۱۸
۱۲	فوق‌دیپلم	الکترونیک- برق صنعتی	اپراتور مونتاژ پلوس	تولید	۲۶
۱۳	دیپلم	تعمیر موتور خودرو	اپراتور مونتاژ پلوس	تولید	۲۱
۱۴	فوق‌لیسانس	مدیریت اجرایی	کارشناس تضمین کیفیت	کیفیت	۱۶
۱۵	فوق‌لیسانس	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 به‌طور انعطاف‌پذیر وزن معیارها را تعیین می‌کند. این روش از مقادیر قطعی برای انجام مقایسه‌های زوجی معیارها استفاده می‌کند و نمی‌تواند وزن آن‌ها را در یک محیط نامشخص تعیین کند. گو و ژائو، FBWM را برای حل این نقص پیشنهاد کردند (Gou et al., 2017). به‌طورکلی مراحل FBWM برای تعیین وزن فازی معیارها به شرح زیر است:

گام ۱. تعیین مجموعه معیارهای تصمیم‌گیری: در این مرحله تصمیم‌گیرنده مجموعه معیارهایی را که برای تصمیم‌گیری موردنیاز است به‌صورت $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$تعریف می‌کند.

گام ۲. تعیین بهترین و بدترین معیار (بااهمیت‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین 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_Wمعرفی 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 بیان‌شده در جدول ۳ ترجیحات فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها تعیین می‌گردد. بردار بهترین نسبت به سایر معیارها به‌صورت زیر است: $\widetilde{A_B} = \{\widetilde{a_{B1}}, \widetilde{a_{B2}}, \dots, \widetilde{a_{Bn}}\}$ برای تعیین اولویت فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها استفاده می‌شود، جایی‌که $\widetilde{A_B}$ نماینده بردار فازی بهترین معیار نسبت به سایر معیارها است. $\widetilde{a_{Bj}} = (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj})$ عملکرد فازی بهترین معیار C_B به معیار j را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که j = {1, 2, . . . , n}، بنابراین می‌توان استدلال کرد که $\widetilde{a_{BB}} = (1,1,1)$. از سوی دیگر، تعیین ترجیح فازی همه معیارها نسبت به معیار بدترین (OW) را می‌توان با استفاده از $\widetilde{A_W} = \{\widetilde{a_{1W}}, \widetilde{a_{2W}}, \dots, \widetilde{a_{nW}}\}$ محاسبه کرد که در آن $\widetilde{A_W}$ نشان‌دهنده بردار فازی همه معیارها نسبت به بدترین معیار است. $\widetilde{a_{jW}} = (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW})$ عملکرد فازی معیار j را نسبت به بدترین معیار C_W نشان می‌دهد، به‌طوری‌که j = {1, 2, . . . , n}، بنابراین می‌توان استدلال کرد که $\widetilde{a_{WW}} = (1,1,1)$.

جدول ۳. اعداد فازی متناظر با متغیرهای زبانی (Gou et al., 2017)

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

گام ۴. تعیین وزن‌های فازی بهینه $(\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \ldots, \tilde{w}_n^*)$: طبق گفته گو و ژا[6] (Gou et al., 2017)، یک برنامه‌ریزی غیرخطی بر اساس مؤلفه‌های به‌دست‌آمده از بردارهای OW و BO در مدل زیر ارائه شده است. در این مدل، $\overline{w}_W = (l_W^w, m_W^w, u_W^w)$ و $\overline{w}_j = (l_j^w, m_j^w, u_j^w), \overline{w}_B = (l_B^w, m_B^w, u_B^w)$ 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 پایی میانی و بالا را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که w_B، w_j و w_W در FBWM عدد فازی مثلثی[7] (TFN) هستند که با BWM بسیار متفاوت هستند (Gou et al.,2017).

$$\min \ \xi^k$$

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

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

1 Equally Important
2 Weakly important
3 Fairly important
4 Very important
5 Absolutely important
6 S. Guo, H. Zhao
7 Triangular Fuzzy Number (TFN)

عدد فازی $\tilde{A}$ روی R به عنوان TFN تعریف می‌شود.

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

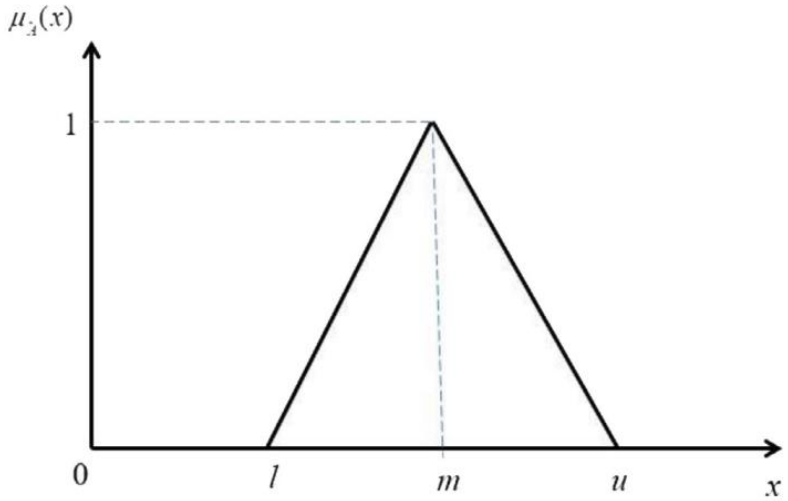
$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(X)) | x \in X\} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

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

تعریف ۲. عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ به‌صورت سه‌گانه (l,m,u) تعریف می‌شود، تابع عضویت با رابطه ۲ و شکل ۲ نشان داده می‌شود.

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

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



گام ۵. حل مدل: مدل توسط نرم‌افزار لینگو حل و اوزان معیارها حاصل می‌شود.

بعد از محاسبه اوزان همه معیارها به کمک روش دی فازی اعداد مثلثی به اعداد قطعی تبدیل می‌شوند تا بر اساس آن اولویت‌بندی شوند.

فازی زدایی (دی فازی[1]):

زمانی که طیف فازی مناسب انتخاب شد و عملیات فازی بر روی مقادیر انجام شد درنهایت به

1 Defuzzification

نتایجی خواهید رسید که فازی‌اند. این نتایج فازی به‌سادگی قابل‌فهم و تفسیر نیستند ازاین‌جهت باید به اعداد قطعی (معمولی) تبدیل شوند. روش‌های مختلفی برای این کار پیشنهاد شده است. در پژوهش حاضر از روش نمایش یکپارچه میانگین درجه‌بندی‌شده (Chen & Hsieh, 1999) استفاده شده است.

$$\mathrm{R}(\widetilde{W_j}) = \frac{l_j^w + 4 \times m_j^w + u_j^w}{6} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

گام ۶. در مقایسات زوجی سازگاری کامل به‌سختی 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 به‌دست‌آمده و شاخص سازگاری بر اساس مقدار $\widetilde{a_{BW}}$ به همراه عدد فازی مثلثی در جدول ۴ نشان داده شده است. اگر مقدار CR کوچک‌تر مساوی 0.25 باشد بردارهای BO و OW دارای سازگاری بیشتری است هرچند مقدار مشخصی برای تعیین سازگاری یا عدم سازگاری بردارهای BO و OW وجود ندارد. $\widetilde{a_{BW}}$ همان $\widetilde{a_{BW}} = (l_{BW}, m_{BW}, u_{BW})$ است درصورتی‌که نرخ سازگاری کوچک‌تر مساوی 0.25 باشد، داده‌ها از سازگاری بسیار بالایی برخوردار هستند (Gou et al., 2017).

جدول ٤. شاخص سازگاری (Gou et al., 2017)

	اهمیت مساوی	اهمیت ضعیف	نسبتاً مهم	خیلی مهم	کاملاً مهم
a_{BW}	(1,1,1,)	(0.6667,1,1.5)	(1.5,2,2.5)	(2.5,3,3.5)	(3.5,4,4.5)
C_i	3	3.80	5.29	6.69	8.04

روش ویکور فازی (FVIKOR):

اپریکوویک[1] (۲۰۱۱) در مقاله‌ای گام‌های ویکور فازی را به‌صورت زیر بیان نمود.

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

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

هر ستون نشان‌دهنده یک شاخص سنجش و هر سطر نماینده یک گزینه است. x_{ij} بیانگر کمیت گزینه i ام

1 Opricovic, S

در زیرمعیار j ام است. همچنین زیرمعیارها برحسب 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, 2014)

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 به دست آوردن ماتریس، بایستی مراحل طی شود:

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

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

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

ولی در صورتی‌که معیار j ام، معرف هزینه باشد $\tilde{f}_j^*$ و $\tilde{f}_j^o$ از روابط ۷ و ۸ بدست می‌آید:

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

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

۲-۲. به دست آوردن مقادیر نرمالایز شده: اگر $\tilde{f}_j^* = (l_j^*, m_j^*, u_j^*)$ و $\tilde{f}_j^o = (l_j^o, m_j^o, u_j^o)$ باشد، مقادیر نرمالیزه شده بدین‌صورت به دست می‌آید:

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

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

گام ۳. محاسبه سودمندی $(\tilde{S}_i)$ و تأسف $(\tilde{R}_i)$ گزینه‌ها: با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ مقدار سودمندی و تأسف گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

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

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

گام ۴. محاسبه شاخص ویکور $(\tilde{Q}_i)$: شاخص ویکور از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود. در این رابطه V، وزنی برای بیشینه مطلوبیت گروهی است که مقدار آن می‌تواند بین ۰ و ۱ باشد که در این پژوهش ۰٫۵ در نظر گرفته شده است.

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

که در این رابطه:

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

$$S^{or} = \max_i S_i^r \quad \text{(رابطه ۱۵)} \qquad R^{or} = \max_i R_i^r \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

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 (Zhao, 2017 & Guo) - منبع اصلی روش بهترین-بدترین فازی در این پژوهش - برای اوزان معرفی کرده‌اند و رابطه ۱۸ دقیقاً همان فرمولی است که اوپریکوویچ (Opricovic, 2011)- منبع اصلی روش ویکور فازی - برای شاخص‌های S، R و Q ارائه کرده است. به‌کارگیری فرمول دیفازی‌سازی مرجع هر روش در همان مرحله، رویه‌ای پذیرفته‌شده در ترکیب این دو روش است (Tian et al., 2018).

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

آستانه غربالگری و معیار خاتمه دلفی

1 Graded Mean Integration Representation

در هر سه دور دلفی (شاخص‌ها و حالت‌های خرابی)، تأیید یا حذف هر آیتم 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 ۴ و ۵) را نشان می‌دهد و با رویه رشیدی و همکاران (۱۳۹۳) هم‌خوانی دارد. آیتم‌هایی 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 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 به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده اهمیت حالات خرابی معرفی شده‌اند (McDermott et al., 2009). این پنج شاخص در دور اول دلفی توسط پانزده خبره بر اساس طیف لیکرت پنج‌درجه‌ای 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 باقی‌مانده (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 تعریف‌شده، فرآیند دلفی شاخص‌ها پس از دور سوم متوقف شد. با توجه به بیش از ده‌نفر بودن پانل خبرگان، این مقدار ضریب کندال ازنظر آماری معنادار است (مشایخی و همکاران، ۱۴۰۰).

تعیین بهترین و بدترین شاخص و وزن‌دهی با روش بهترین-بدترین فازی:

از میان چهار شاخص نهایی، خبرگان به‌صورت جمعی شاخص شدت را به‌عنوان بهترین (بااهمیت‌ترین) و شاخص تشخیص را به‌عنوان بدترین (کم‌اهمیت‌ترین) معیار تعیین کردند. سپس پرسشنامه مقایسات زوجی، توسط همان پانزده خبره، بر اساس طیف پنج‌تایی فازی تکمیل و با روش میانگین هندسی تجمیع شد. با حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بهترین-بدترین فازی در نرم‌افزار لینگو (پیوست ۱)، مقدار بهینه تابع هدف $Z = k^* = 0.4267$ و وزن فازی معیارها به دست آمد. این اوزان با استفاده از فرمول *GMIR*

(رابطه 3) دیفازی شدند تا وزن قطعی و رتبه نهایی معیارها حاصل شود (جدول 6).

جدول ٦. نتایج دلفی، مقایسات زوجی فازی و وزن نهایی معیارها

معیار	میانگین 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	رتبه
شدت	۴,۸۶۷	(۱،۱،۱)	(۲,۰۱۹،۲,۵۳۱،۳,۰۵۸)	(۰,۳۸،۰,۴۱۴،۰,۴۱۴)	۰,۴۰۸	۱
وقوع	۳,۲۶۷	(۲,۱۱۷،۲,۶۳،۳,۱۷۸)	(۱,۳۱۵،۱,۷۶۹،۲,۳۱۸)	(۰,۱۳۸،۰,۱۸۸،۰,۲۲۵)	۰,۱۸۶	۳
تشخیص	۳,۷۳۳	(۲,۰۱۹،۲,۵۳۱،۳,۰۵۸)	(۱،۱،۱)	(۰,۱۱۹،۰,۱۴،۰,۱۵۵)	۰,۱۳۹	۴
هزینه	۳,۶۶۷	(۱,۲۵۶،۱,۷۰۸،۲,۲۵۴)	(۱,۸۴۹،۲,۳۵۲،۲,۸۹)	(۰,۲۲۱،۰,۲۶۹،۰,۲۹۳)	۰,۲۶۵	۲

* انحراف معیار دور سوم برای شدت، وقوع، تشخیص و هزینه به‌ترتیب 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 $CI = 6.69$ می‌باشد (Guo et al., 2017). بنابراین $CR = \frac{k^*}{CI} = \frac{0.4267}{6.69} \approx 0.064$. این مقدار به‌طور قابل‌توجهی کمتر از آستانه ۰,۲۵ است و سازگاری بسیار بالای مقایسات زوجی پانل خبرگان را تأیید می‌کند. شایان‌ذکر است که مقدار $Z = 0.4267$ 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 بوده‌اند.

شناسایی و غربالگری حالت‌های بالقوه خرابی:

در راستای تکمیل مطالعات پیشین و بهره‌گیری از دانش تخصصی حاصل از ادبیات موضوع و اطلاعات شرکت موردمطالعه، یک مرحله نظرسنجی از خبرگان برای شناسایی حالت‌های بالقوه شکست صورت پذیرفت. درمجموع، 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 بیش‌ازحد 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 کرونباخ پرسشنامه در دور دوم ۰,۹۱ و ضریب هماهنگی کندال ۰,۲۴۷ بود؛ هیچ حالتی در دور دوم میانگین کمتر از ۳ کسب نکرد. در دور سوم، آلفای کرونباخ ۰,۹ و ضریب هماهنگی کندال ۰,۲۵۴ محاسبه شد. ازآنجاکه تفاوت

ضریب کندال بین دور دوم و سوم تنها ۰,۰۰۷ 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 هماهنگی 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 آیتم‌های رتبه‌بندی‌شده (N) در این دو فرآیند دلفی مستقل است – شاخص‌ها $N = 4$ و حالت‌های خرابی 71 تا $N = 68$. ضریب هماهنگی کندال به N حساس است و دستیابی به توافق کامل میان پانزده خبره بر سر رتبه‌بندی ۶۸ آیتم، به‌مراتب دشوارتر از توافق بر سر چهار آیتم است. بااین‌حال، 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 پایدارشدن 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[1] (FM 1 تا FM 68) در سطرها و چهار معیار (شدت، وقوع، تشخیص، هزینه) در ستون‌ها، بر اساس طیف فازی پنج‌درجه‌ای (Kant, 2014 & Patil) 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). داده های 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 ٦٨ مورد)

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۱	۰,۰۱۹۵	FM 32	عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION
۲	۰,۰۳۴۹	FM 65	مقاومت کشش کم Stopper Bearing
۳	۰,۰۳۵۲	FM 56	دفرمگی هزارخار
۴	۰,۰۳۶۴	FM 4	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه
۵	۰,۰۴۶۸	FM 13	برخورد شافت با لبه boot و خراشیدگی عمقی با پارگی
۶	۰,۰۴۸۵	FM 27	قرارگیری ناصحیح TRUNNION در مونتاژ خار روی اسپایدر CIRCLIP

1 Failure Mode (FM)

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۷	۰٫۰۶۱۳	FM 66	عدم آببندی مناسب گردگیر
۸	۰٫۰۷۰۸	FM 39	وجود آب در گریس
۹	۰٫۰۷۵۵	FM 30	عدم مونتاژ صحیح شفت در O/R
۱۰	۰٫۰۷۵۹	FM 3	ریختن مواد اولیه
۱۱	۰٫۰۷۷۳	FM 49	بیرون زدن گردگیر در فرآیند جازدن گردگیر روی هوزینگ
۱۲	۰٫۰۸۱۹	FM 55	دفرمگی رزوه
۱۳	۰٫۰۸۴۳	FM 21	نبود سوراخ اشپیل در مونتاژ BJ/H
۱۴	۰٫۰۸۴۷	FM 25	نبودن Retainer
۱۵	۰٫۰۸۹۷	FM 63	عدم استحکام پیچشی کافی
۱۶	۰٫۰۹۰۰	FM 20	کم بودن تعداد ساچمه‌ها در مونتاژ BJ/H
۱۷	۰٫۰۹۰۶	FM 9	شناسایی اشتباه مواد
۱۸	۰٫۰۹۴۴	FM 62	عدم مقاومت پیچشی دینامیکی
۱۹	۰٫۱۰۰۰	FM 59	عدم وجود حک و سریال در کنترل نهایی
۲۰	۰٫۱۰۲۴	FM 48	عدم قرارگیری مناسب پولک و فنر در مونتاژ گردگیر و پولک

* هرچه مقدار *Q* یک ریسک کمتر باشد، آن ریسک بحرانی‌تر است؛ بر این اساس، عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش *TRUNNION* رتبه اول را ازنظر بحرانی‌بودن کسب کرده است.

نتایج نشان داد سه حالت خرابی عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش *TRUNNION* (*FM32*، ۰۱۹۵/۰*Q*=)، مقاومت کشش کم *Stopper Bearing* (*FM65*، ۰۳۴۹/۰*Q*=) و دفرمگی هزارخار (*FM56*، ۰۳۵۲/۰*Q*=) بالاترین اولویت ریسک را به خود اختصاص دادند.

مقایسه با شاخص اولویت ریسک سنتی:

به‌منظور نشان‌دادن تفاوت رویکرد پیشنهادی با اولویت‌بندی سنتی، برای دوازده حالت خرابی که داده کامل ماتریس تصمیم آن‌ها در پیوست مقاله موجود است *FM1-6* و *fm63-68*)، یک شاخص افزایشی ساده — حاصل‌جمع مقادیر میانه (*m*) اعداد فازی هر چهار معیار — محاسبه و رتبه‌بندی حاصل با رتبه‌بندی *FVIKOR* مقایسه شد (جدول ۸). نتایج نشان می‌دهد 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 قابل‌توجهی دارند: «عدم کشش گردگیر» (*FM64*) 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=5.4*) پایین و تشخیص آن (*mD=6.6*) بالاست، درحالی‌که معیار تشخیص کم‌وزن‌ترین معیار است. به همین ترتیب، «آسیب‌دیدگی سطحی در بسته‌بندی» (*FM67*) در رتبه یازدهم ساده قرار می‌گیرد اما *FVIKOR* آن را به رتبه ۶۱ می‌فرستد (*mS=5*٫۰، *mD=6.2*). در مقابل، «مقاومت کشش

کم *Stopper Bearing* (FM65) با شدت بالا (mS=7) و تشخیص پایین (mD=3.4) 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	FM3	ریختن مواد اولیه	*7.67*	*5.53*	*7.13*	*6.47*	*26.80*	*0.076*	۱۰	۹↓
۲	FM4	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه	*6.87*	*7.13*	*3.80*	*9.00*	*26.80*	*0.036*	۴	۲↓
۳	FM65	مقاومت کشش کم *Stopper Bearing*	*7.00*	*6.60*	*3.40*	*8.60*	*25.60*	*0.035*	۲	۱↑
۴	FM66	عدم آب‌بندی مناسب گردگیر	*8.60*	*3.40*	*5.00*	*7.00*	*24.00*	*0.061*	۷	۳↓
۵	FM63	عدم استحکام پیچشی کافی	*7.40*	*3.40*	*5.00*	*7.40*	*23.20*	*0.090*	۱۵	۱۰↓
۶	FM64	عدم کشش گردگیر	*5.40*	*5.00*	*6.60*	*5.00*	*22.00*	*0.199*	**۴۶**	**۴۰↓**
۷	FM2	شناسایی اشتباه مواد اولیه	*6.87*	*5.27*	*6.07*	*3.67*	*21.87*	*0.174*	۳۸	۳۱↓
۸	FM5	جنس نامناسب مواد اولیه	*5.53*	*4.73*	*6.33*	*5.13*	*21.73*	*0.191*	۴۳	۳۵↓
۹	FM1	ضرب‌خوردگی مواد اولیه	*5.67*	*5.13*	*5.53*	*4.87*	*21.20*	*0.181*	۴۱	۳۲↓
۱۰	FM6	خواص مکانیکی نامطلوب	*7.53*	*4.20*	*5.40*	*4.07*	*21.20*	*0.152*	۳۳	۲۳↓
۱۱	FM67	آسیب‌دیدگی سطحی در بسته‌بندی	*5.00*	*5.00*	*6.20*	*3.40*	*19.60*	*0.244*	**۶۱**	**۵۰↓**
۱۲	FM68	عدم دسترسی/مفقودی در بسته‌بندی	*6.20*	*5.40*	*3.00*	*4.60*	*19.20*	*0.143*	۲۸	۱۶↓*

* شاخص مجموع میانه = $mS + mO + mD + mC$؛ رتبه‌بندی بر اساس مجموع میانه: بالاتر = بحرانی‌تر. رتبه‌بندی *FVIKOR* از میان ۶۸ حالت خرابی است؛ پایین‌تر = بحرانی‌تر. ردیف‌های رنگی نشان‌دهنده مهم‌ترین اختلاف‌های رتبه‌بندی بین دو رویکرد هستند. *mS*=میانه شدت، *mO*=میانه وقوع، *mD*=میانه تشخیص (وزن‌های *FBWM*: شدت=۰٫۴۰۸، وقوع=۰٫۱۸۶، تشخیص=۰٫۱۳۹، هزینه=۰٫۲۶۵).

تحلیل حساسیت پارامتر توافق ویکور:

به‌منظور ارزیابی پایداری رتبه‌بندی، تحلیل حساسیت بر روی پارامتر توافق ویکور (v) انجام شد. با استفاده از مقادیر S(Crisp) و R(Crisp) زیرنمونه 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 FM3، FM4، FM65 و FM66 در تمامی مقادیر v به‌طور پیوسته در رتبه‌های ۱ تا ۴ زیرنمونه قرار دارند؛ تنها جابه‌جایی مشاهده‌شده، تغییر رتبه‌های داخلی این چهار مورد با یکدیگر است (FM66 در $v = 0$ رتبه ۱ و FM4 در $v \geq 0.75$ رتبه ۱ می‌گیرد). مهم‌تر اینکه، رتبه‌بندی هشت حالت خرابی باقی‌مانده (FM63، FM68، FM6، FM2، FM1، FM5، FM64 و FM67) 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 زیرنمونه ۱۲ حالت خرابی

کد	حالت بالقوه شکست	S(Crisp)	R(Crisp)	v=۰		v=۰/۲۵		v=۰/۵		v=۰/۷۵		v=۱		رتبه	ثبات رتبه
				Q	رتبه	Q	رتبه	Q	رتبه	Q	رتبه	Q	رتبه		
FM3	ریختن مواد اولیه	۰,۲۱۸	۰,۰۸۷	۰,۰۱۱۴	۲	۰,۱۰۴۸	٤	۰,۱۹۸۲	٤	۰,۲۹۱۷	٤	۰,۳۸۵۱	٤	٤	۲±
FM4	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه	۰,۰۹۹	۰,۰۹۴	۰,۰۹۰۹	٤	۰,۰۶۸۲	۲	۰,۰۴۵۵	۲	۰,۰۲۲۷	۱	۰,۰۰۰۰	۱	۱	۳±
FM65	مقاومت کشش کم Stopper Bearing	۰,۱۱۰	۰,۰۸۹	۰,۰۳۴۱	۳	۰,۰۳۴۵	۱	۰,۰۳۴۸	۱	۰,۰۳۵۲	۲	۰,۰۳۵۶	۲	۲	۲±
FM66	عدم آب‌بندی مناسب گردگیر	۰,۱۸۴	۰,۰۸۶	۰,۰۰۰۰	۱	۰,۰۶۸۸	۳	۰,۱۳۷۵	۳	۰,۲۰۶۳	۳	۰,۲۷۵۱	۳	۳	۲±
FM63	عدم استحکام پیچشی کافی	۰,۲۲۳	۰,۰۹۸	۰,۱۳۶۴	۵	۰,۲۰۲۶	۵	۰,۲۶۸۸	۵	۰,۳۳۵۱	۵	۰,۴۰۱۳	۵	۵	✓
FM68	عدم دسترسی/مفقودی در بسته‌بندی	۰,۲۷۱	۰,۱۳۰	۰,۵۰۰۰	۶	۰,۵۱۴۲	۶	۰,۵۲۸۳	۶	۰,۵۴۲۵	۶	۰,۵۵۶۶	۶	۶	✓
FM6	خواص مکانیکی	۰,۲۹	۰,۱۳	۰,۵۱۱	۷	۰,۵۴۰۵	۷	۰,۵۶۹	۷	۰,۵۹۸۷	۷	۰,۶۲۷	۷	۷	✓

ثبات رتبه	رتبه	v=۱		v=۰/۷۵		v=۰/۵		v=۰/۲۵		v=۰		R(Crisp)	S(Crisp)	حالت بالقوه شکست	کد
		Q	رتبه	Q	رتبه	Q	رتبه	Q	رتبه	Q	رتبه				
		۸				۶				۴		۱	۳	نامطلوب	
✓	۸	۰,۷۰۵۵	۸	۰,۶۸۸۲	۸	۰,۶۷۰۹	۸	۰,۶۵۳۶	۸	۰,۶۳۶۴	۸	۰,۱۴۲	۰,۳۱۷	شناسایی اشتباه مواد اولیه	FM2
✓	۹	۰,۷۴۴۳	۹	۰,۷۲۳۰	۹	۰,۷۰۱۷	۹	۰,۶۸۰۴	۹	۰,۶۵۹۱	۹	۰,۱۴۴	۰,۳۲۹	ضرب‌خوردگی مواد اولیه	FM1
✓	۱۰	۰,۸۰۹۱	۱۰	۰,۷۷۷۳	۱۰	۰,۷۴۵۴	۱۰	۰,۷۱۳۶	۱۰	۰,۶۸۱۸	۱۰	۰,۱۴۶	۰,۳۴۹	جنس نامناسب مواد اولیه	FM5
✓	۱۱	۰,۸۲۸۵	۱۱	۰,۸۰۶۰	۱۱	۰,۷۸۳۶	۱۱	۰,۷۶۱۱	۱۱	۰,۷۳۸۶	۱۱	۰,۱۵۱	۰,۳۵۵	عدم کشش گردگیر	FM64
✓	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۱,۰۰۰۰	۱۲	۰,۱۷۴	۰,۴۰۸	آسیب‌دیدگی سطحی در بسته‌بندی	FM67

* ردیف‌های سبزرنگ: چهار اولویت برتر که در همه مقادیر v پایدار ماندند. ثبات ✓ = رتبه کاملاً بدون تغییر در تمام v ها. S* = ۰۹۹/۰ (FM4)؛ °S = ۴۰۸/۰ (FM67)؛ R* = ۰۸۶/۰ (FM66)؛ °R = ۱۷۴/۰ (FM67). نرمال‌سازی در سطح زیرنمونه 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 باهدف 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 سؤال 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 سؤالات 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 شناسایی‌شده، 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. پیشنهادها

رتبه	حالت خرابی	کنترل پیشگیری	کنترل تشخیصی	اقدامات پیشنهادی
۱	عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION	کنترل نیروی پرس به‌صورت ۱۰۰٪ با نمایشگر و لودسل	کنترل نیروی پرس به‌صورت ۱۰۰٪ با نمایشگر و لودسل	—
۲	مقاومت کشش کم Stopper Bearing	اجرایMSA	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	اجرایMSA	کنترل توسط گیج	—
۴	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه	کالیبراسیون ابزار اندازه‌گیری	استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری استاندارد	آموزش نقشه قطعات جدید به بازرس کنترل
۵	برخورد شافت با لبه Bootو خراشیدگی عمقی با پارگی	—	بازرسی ۱۰۰٪ ظاهری-چشمی توسط اپراتور تولید و بازرس کیفیت	—
۶	قرارگیری ناصحیح	کنترل فشار باد سالن در	کنترل ۱۰۰٪ با استفاده از	—

رتبه	حالت خرابی	کنترل پیشگیری	کنترل تشخیصی	اقدامات پیشنهادی
	TRUNNIONدر مونتاژ خار روی اسپایدرCIRCLIP	ابتدای شیفت	عکس مونتاژ صحیح (QSW-EN-144)	
۷	عدم آب‌بندی مناسب گردگیر	اجرایMSA	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 شفت درO/R	کنترل نیروی پرس ۱۰۰٪ با نمایشگر	کنترل ۱۰۰٪ با عکس مونتاژ صحیح(QSW-EN-145)و تست کشش	—
۱۰	ریختن مواد اولیه	رعایت دستورالعمل QSW-PL_16/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 تجمیع شد (رویکرد همگن‌سازی)، درحالی‌که 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., 2022) با ترکیب دلفی، بهترین–بدترین فازی، K-means و کوپراس فازی در صنعت خودرو ایران به‌کاربرده 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. درنهایت، 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.

سپاسگزاری

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

تعارض منافع

این مقاله فاقد تعارض منافع است.

ORCID

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

پیوست ۱. خروجی BWM فازی در نرم‌افزار 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
FM1	(۰,۰۶۷،۰,۳۳۳،۰,۷۳۳-)	(۰,۲۴۶،۰,۲۴۶،۰,۷۳۸-)	(۰,۱۵۷،۰,۲۷۱،۰,۷-)	(۰,۰۱۳،۰,۴۱۳،۰,۸۱۳)
FM2	(۰,۱۸۷،۰,۲۱۳،۰,۶۱۳-)	(۰,۲۶۲،۰,۲۳،۰,۷۲۱-)	(۰,۱،۰,۳۲۹،۰,۷۵۷-)	(۰,۱۳۳،۰,۵۳۳،۰,۹۳۳)
FM3	(۰,۲۶۷،۰,۱۳۳،۰,۵۲-)	(۰,۲۹۵،۰,۱۹۷،۰,۶۸۹-)	(۰,۰۱۴،۰,۴۴۳،۰,۸۷۱)	(۰,۱۴۷،۰,۲۵۳،۰,۶۵۳-)
FM4	(۰,۱۸۷،۰,۲۱۳،۰,۶۱۳-)	(۰,۴۹۲،۰،۰,۴۹۲-)	(۰,۳۴۳،۰,۰۸۶،۰,۵۱۴-)	(۰,۴،۰،۰,۴-)
FM5	(۰,۰۵۳،۰,۳۴۷،۰,۷۴۷-)	(۰,۱۹۷،۰,۲۹۵،۰,۷۸۷-)	(۰,۰۷۱،۰,۳۵۷،۰,۷۸۶-)	(۰,۰۱۳،۰,۳۸۷،۰,۷۸۷-)
FM6	(۰,۲۵۳،۰,۱۴۷،۰,۵۴۷-)	(۰,۱۳۱،۰,۳۶۱،۰,۸۵۲-)	(۰,۱۷۱،۰,۲۵۷،۰,۶۸۶-)	(۰,۰۹۳،۰,۴۹۳،۰,۸۹۳)
...	...	...	...	...
FM63	(۰,۲۴،۰,۱۶،۰,۵۶-)	(۰,۰۳۳،۰,۴۵۹،۰,۹۵۱-)	(۰,۲۱۴،۰,۲۱۴،۰,۶۴۳-)	(۰,۲۴،۰,۱۶،۰,۵۶-)
FM64	(۰,۰۴،۰,۳۶،۰,۷۶-)	(۰,۲۳،۰,۲۶۲،۰,۷۵۴-)	(۰,۰۴۳،۰,۳۸۶،۰,۸۱۴-)	(۰،۰,۴،۰,۸)
FM65	(۰,۲،۰,۲،۰,۶-)	(۰,۴۲۶،۰,۰۶۶،۰,۵۵۷-)	(۰,۳۸۶،۰,۰۴۳،۰,۴۷۱-)	(۰,۳۶،۰,۰۴،۰,۴۴-)
FM66	(۰,۳۶،۰,۰۴،۰,۴۴-)	(۰,۰۳۳،۰,۴۵۹،۰,۹۵۱-)	(۰,۲۱۴،۰,۲۱۴،۰,۶۴۳-)	(۰,۲،۰,۲،۰,۶-)
FM67	(۰،۰,۴،۰,۸)	(۰,۲۳،۰,۲۶۲،۰,۷۵۴-)	(۰,۰۸۶،۰,۳۴۳،۰,۷۷۱-)	(۰,۱۶،۰,۵۶،۰,۹۶)
FM68	(۰,۱۲،۰,۲۸،۰,۶۸-)	(۰,۲۷۹،۰,۲۱۳،۰,۷۰۵-)	(۰,۴۲۹،۰،۰,۴۲۹-)	(۰,۰۴،۰,۴۴،۰,۸۴)

پیوست ۳. سودمندی، تأسف و شاخص ویکور گزینه‌ها

گزینه	S	R	Q	S(Crisp)	R(Crisp)	Q(Crisp)
FM1	(۰,۰۹۱،۰,۳۲۹،۰,۷۴۹-)	(۰,۰۰۴،۰,۱۳۶،۰,۲۹۹)	(۰,۴۱۳،۰,۱۶۵،۰,۸۰۵-)	۰,۳۲۹	۰,۱۴۴	۰,۱۸۱
FM2	(۰,۱۰۴،۰,۳۱۷،۰,۷۳۷-)	(۰,۰۳۵،۰,۱۴۱،۰,۲۵)	(۰,۳۸۴،۰,۱۶۶،۰,۷۴۸-)	۰,۳۱۷	۰,۱۴۲	۰,۱۷۴

گزینه	S	R	Q	S(Crisp)	R(Crisp)	Q(Crisp)
FM3	(۰,۲۰۱،۰,۲۲،۰,۶۳۵-)	(۰,۰۰۲،۰,۰۶۷،۰,۲۱۲)	(۰,۴۵۸،۰,۰۴۸،۰,۶۶۶-)	۰,۲۱۸	۰,۰۸۷	۰,۰۷۶
FM4	(۰,۳۲۱،۰,۰۹۹،۰,۵۱۹-)	(۰,۰۴۸،۰,۰۸۷،۰,۲۵-)	(۰,۵۵۹،۰,۰۲۲،۰,۶۶۲-)	۰,۰۹۹	۰,۰۹۴	۰,۰۳۶
FM5	(۰,۰۷۲،۰,۳۴۹،۰,۷۶۹-)	(۰,۰۰۴،۰,۱۴۲،۰,۳۰۵-)	(۰,۴۱۳،۰,۱۷۹،۰,۸۱۹-)	۰,۳۴۹	۰,۱۴۶	۰,۱۹۱
FM6	(۰,۱۲۷،۰,۲۹۳،۰,۷۱۴-)	(۰,۰۲۵،۰,۱۳۱،۰,۲۳۷)	(۰,۴۰۵،۰,۱۴۵،۰,۷۲۴-)	۰,۲۹۳	۰,۱۳۱	۰,۱۵۲
...	...	...	...	...	...	...
FM63	(۰,۱۹۷،۰,۲۲۳،۰,۶۴۳-)	(۰,۰۰۶،۰,۰۸۵،۰,۲۲۹-)	(۰,۴۶۶،۰,۰۶۹،۰,۶۸۷-)	۰,۲۲۳	۰,۰۹۸	۰,۰۹۰
FM64	(۰,۰۶۵،۰,۳۵۵،۰,۷۷۶-)	(۰،۰,۱۴۷،۰,۳۱)	(۰,۴۰۷،۰,۱۸۷،۰,۸۲۸-)	۰,۳۵۵	۰,۱۵۱	۰,۱۹۹
FM65	(۰,۳۱،۰,۱۱،۰,۵۳۱-)	(۰,۰۵۴،۰,۰۸۲،۰,۲۴۵-)	(۰,۵۶۱،۰,۰۲،۰,۶۶-)	۰,۱۱۰	۰,۰۸۹	۰,۰۳۵
FM66	(۰,۲۳۶،۰,۱۸۴،۰,۶۰۵-)	(۰,۰۰۶،۰,۰۸۵،۰,۱۸-)	(۰,۴۸۱،۰,۰۵۳،۰,۶۱۹-)	۰,۱۸۴	۰,۰۸۶	۰,۰۶۱
FM67	(۰,۰۱۲،۰,۴۰۸،۰,۸۲۸-)	(۰,۰۴۲،۰,۱۶۳،۰,۳۲۷)	(۰,۳۴،۰,۲۲۶،۰,۸۶۶-)	۰,۴۰۸	۰,۱۷۴	۰,۲۴۴
FM68	(۰,۱۵،۰,۲۷۱،۰,۶۹۱-)	(۰,۰۱۱،۰,۱۱۷،۰,۲۷۸)	(۰,۴۲۹،۰,۱۲۱،۰,۷۵۹-)	۰,۲۷۱	۰,۱۳۰	۰,۱۴۳

پیوست ٤. اولویت‌بندی نهایی حالت‌های شکست

رتبه	مقدار Q	کد	نام ریسک
۱	۰,۰۱۹۵	FM 32	عدم تحمل نیروی کشش در تست کشش TRUNNION
۲	۰,۰۳۴۹	FM 65	مقاومت کشش کم Stopper Bearing
۳	۰,۰۳۵۲	FM 56	دفرمگی هزارخار
۴	۰,۰۳۶۴	FM 4	مغایرت ابعادی قطعه با نقشه
۵	۰,۰۴۶۸	FM 13	برخورد شافت با لبه boot و خراشیدگی عمقی با پارگی
۶	۰,۰۴۸۵	FM 27	قرارگیری ناصحیح TRUNNION در مونتاژ خار روی اسپایدر CIRCLIP
۷	۰,۰۶۱۳	FM 66	عدم آببندی مناسب گردگیر
۸	۰,۰۷۰۸	FM 39	وجود آب در گریس
۹	۰,۰۷۵۵	FM 30	عدم مونتاژ صحیح شفت در O/R
۱۰	۰,۰۷۵۹	FM 3	ریختن مواد اولیه
۱۱	۰,۰۷۷۳	FM 49	بیرون زدن گردگیر در فرآیند جازدن گردگیر روی هوزینگ
۱۲	۰,۰۸۱۹	FM 55	دفرمگی رزوه

نام ریسک	کد	مقدار Q	رتبه
نبود سوراخ اشپیل در مونتاژ BJ/H	FM 21	۰,۰۸۴۳	۱۳
نبودن Retainer	FM 25	۰,۰۸۴۷	۱۴
عدم استحکام پیچشی کافی	FM 63	۰,۰۸۹۷	۱۵
کم بودن تعداد ساچمه‌ها در مونتاژ BJ/H	FM 20	۰,۰۹۰۰	۱۶
شناسایی اشتباه مواد	FM 9	۰,۰۹۰۶	۱۷
عدم مقاومت پیچشی دینامیکی	FM 62	۰,۰۹۴۴	۱۸
عدم وجود حک و سریال در کنترل نهایی	FM 59	۰,۱۰۰۰	۱۹
عدم قرارگیری مناسب پولک و فنر در مونتاژ گردگیر و پولک	FM 48	۰,۱۰۲۴	۲۰
عدم وجود اسفریکال رولر	FM 37	۰,۱۰۷۲	۲۱
درآمدن بلبرینگ در پرس بوش بلبرینگ	FM 42	۰,۱۱۴۲	۲۲
کم بودن نیدل در دوباره‌کاری مونتاژ اسپایدر	FM 24	۰,۱۲۱۷	۲۳
جا نخوردن boot در محل خود	FM 14	۰,۱۳۰۴	۲۴
جا نخوردن BJ-SHAFT CIRCLIP	FM 16	۰,۱۳۱۰	۲۵
جدا شدن ABS	FM 22	۰,۱۳۳۷	۲۶
تزریق ناصحیح گریس (بیرون زدن گریس) در تزریق گریس داخل BOOT BJ	FM 34	۰,۱۴۰۳	۲۷
عدم دسترسی سریع و یا مفقودی در فرآیند بسته‌بندی	FM 68	۰,۱۴۳۱	۲۸
عدم مونتاژ صحیح RING SNAP	FM 29	۰,۱۴۸۸	۲۹
زیاد بودن گریس تزریقی	FM 36	۰,۱۴۹۲	۳۰
لقی مجموعه پلوس	FM 61	۰,۱۵۲۲	۳۱
زیاد بودن وزن گریس در مونتاژ BJ/H	FM 18	۰,۱۵۲۴	۳۲
خواص مکانیکی نامطلوب	FM 6	۰,۱۵۲۵	۳۳
استفاده از هوزینگ نامناسب	FM 43	۰,۱۵۴۲	۳۴
تزریق نامناسب گریس در مونتاژ گردگیر و پولک	FM 46	۰,۱۵۸۱	۳۵
قرار نگرفتن بست در شیار گردگیر در فرآیند بستن large band BJ	FM 51	۰,۱۶۳۳	۳۶
بیرون زدن گریس از زیر BOOT	FM 38	۰,۱۶۹۷	۳۷
شناسایی اشتباه مواد اولیه	FM 2	۰,۱۷۴۰	۳۸
وجود فاصله بین بوش و بلبرینگ در پرس بوش بلبرینگ	FM 40	۰,۱۷۸۰	۳۹
عدم بسته بودن BJ بند	FM 57	۰,۱۷۸۷	۴۰
ضرب خوردگی مواد اولیه	FM 1	۰,۱۸۰۷	۴۱
کثیفی و زنگ زدگی مواد اولیه	FM 7	۰,۱۹۰۲	۴۲
جنس نامناسب مواد اولیه	FM 5	۰,۱۹۰۸	۴۳
کم بودن تعداد نیدل‌ها در مونتاژ اسپایدر	FM 23	۰,۱۹۱۱	۴۴
افتادن فنر به صورت افقی در دوباره کاری پرس بوش بلبرینگ	FM 44	۰,۱۹۶۰	۴۵
عدم کشش گردگیر	FM 64	۰,۱۹۸۹	۴۶
کم بودن وزن گریس در تزریق گریس داخل BOOT BJ	FM 33	۰,۲۰۱۵	۴۷

نام ریسک	کد	مقدار Q	رتبه
عدم بسته بودن TJ بند	FM 58	۰,۲۱۰۶	۴۸
قرار نگرفتن بست در شیار گردگیر در فرآیند بستن large band TJ	FM 50	۰,۲۱۶۱	۴۹
تنظیم نبودن فاصله بلبرینگ تا انتهای شفت در پرس بوش بلبرینگ	FM 41	۰,۲۱۶۳	۵۰
قرار نگرفتن خار در شیار هوزینگ در مونتاژ گردگیر و پولک	FM 47	۰,۲۱۷۷	۵۱
کم بودن وزن گریس در مونتاژ BJ/H	FM 17	۰,۲۲۱۷	۵۲
کم بودن وزن پلوس	FM 60	۰,۲۲۲۹	۵۳
خرابی رزوه Outer race	FM 31	۰,۲۲۳۷	۵۴
باز بودن دهانه بست در مونتاژ CIRCLIP BJ برروی شافت BJ/S و پرس بست	FM 15	۰,۲۲۶۱	۵۵
روانی کم مجموعه در مونتاژ BJ/H	FM 19	۰,۲۲۶۳	۵۶
افتادن cap از روی فنر در دوباره کاری پرس بوش بلبرینگ	FM 45	۰,۲۲۶۳	۵۷
جابجا خوردن مونتاژ گردگیرها و بست‌ها	FM 11	۰,۲۳۲۳	۵۸
نگذاشتن Trunnion Circlip	FM 26	۰,۲۳۸۵	۵۹
ریختن مواد در انتقال	FM 10	۰,۲۴۴۰	۶۰
آسیب‌دیدگی سطحی قطعه در مرحله بسته‌بندی	FM 67	۰,۲۴۴۴	۶۱
خوانا نبودن حک در مرحله برچسب زنی	FM 53	۰,۲۵۹۳	۶۲
سفت بودن گریس	FM 35	۰,۲۶۷۸	۶۳
جا نخوردن صحیح فنر و پولک	FM28	۰,۳۳۶۹	۶۴
حک در محل نامناسب	FM54	۰,۳۴۹۴	۶۵
عدم وضوح بارکد ردیابی در مرحله برچسب زنی	FM52	۰,۳۵۱۹	۶۶
برخورد شافت با لبه boot و خراشیدگی سطحی	FM12	۰,۳۵۵۱	۶۷
ظاهر نامناسب مواد اولیه	FM8	۰,۳۵۹۴	۶۸

منابع

۱. 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*(21)، e99373.

۲. 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*(1)، ۱۴۵.172–

۳. صیامیان، ن.، نصیراحمدی، ک. و احسانی امرئی، ر. (۱۴۰۰). ارزیابی ریسک بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست در صنعت خودروسازی براساس روش FTA و FMEA. *پژوهش و فناوری محیط‌زیست، ۵*(8)، ۱۳۹–159. https://www.magiran.com/p2295853

۴. 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*(20)، ۱۹۱.239–

۵. معصوم‌بیگی، 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 محیط‌زیست، ۱۶*(4)، ۷۸۷.https://www.magiran.com/p2698965 804–

References

6. Akbar, M. A., Naseem, A., Ahmad, Y., & Zaman, U. K. uz. (2024). Production risk analysis and prioritization in manufacturing industry: A hybrid approach using Monte Carlo simulation and DEMATEL analysis. *Ain Shams Engineering Journal, 15*(7), Article 102756. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102756
7. Akkus, D., & Testik, O. M. (2024). A novel method for weighting decision makers for failure mode and effect analysis under intuitionistic fuzzy environment. *Quality and Reliability Engineering International, 40*(4), 1566–1592. https://doi.org/10.1002/qre.3510
8. Amoozad Mahdiraji, H., Hafeez, K., Kord, H., & Abbasi Kamardi, A. A. (2022). Analysing the voice of customers by a hybrid fuzzy decision-making approach. *Management Decision, 60*(2), 399–425. https://doi.org/10.1108/MD-01-2020-0017
9. Baghery, M., Yousefi, S., & Rezaee, M. J. (2018). Risk measurement and prioritization of auto parts manufacturing processes. *Journal of Intelligent Manufacturing, 29*(8), 1803–1825. https://doi.org/10.1007/s10845-016-1226-0
10. Baloch, A. U., & Mohammadian, H. (2016). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy VIKOR and data envelopment analysis-based fuzzy AHP. *International Journal of Advanced and Applied Sciences, 3*(8), 23–30. https://doi.org/10.21833/ijaas.2016.08.005

11. Baynal, K., Sari, T., & Akpinar, B. (2018). Risk management in automotive manufacturing process based on FMEA and grey relational analysis. *Advances in Production Engineering & Management, 13*(1), 69–80. https://doi.org/10.14743/apem2018.1.273
12. Chang, K.-H., Chang, Y.-C., & Lee, Y.-T. (2014). Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA. *International Journal of Information Technology & Decision Making, 13*(6), 1229–1257. https://doi.org/10.1142/S0219622014500631
13. Charan, K. V., Singh, M., Redhu, S., & Soni, G. (2026). 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, 17*, 1495–1509. https://doi.org/10.1007/s13198-026-03171-6
14. Chen, S.-H., & Hsieh, C.-H. (1999). Graded mean integration representation of generalized fuzzy number. *Journal of Chinese Fuzzy Systems, 5*(2), 1–7.
15. Ghoushchi, S. J., Yousefi, S., & Khazaeili, M. (2019). An extended FMEA approach based on Z-MOORA and fuzzy BWM. *Applied Soft Computing, 81*, Article 105505. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105505
16. Guo, S., & Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-Based Systems, 121*, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010
17. Kutlu, A. C., & Ekmekçioğlu, M. (2012). Fuzzy FMEA by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications, 39*(1), 61–67. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.06.121
18. Liou, J. J. H., Guo, B. H. T., Huang, S. W., & Yang, Y. T. (2024). FMEA using interval type-2 fuzzy and multiple-criteria decision-making methods. *Mathematics, 12*(24), Article 3931. https://doi.org/10.3390/math12243931
19. Liu, H.-C. (2016). *FMEA using uncertainty theories and MCDM methods*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1466-6
20. 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
21. McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2009). *The basics of FMEA* (2nd ed.). CRC Press.
22. Mirzaei, S., & Avakhdarestani, S. (2016). Development of FMEA using fuzzy ANP. *International Journal of Productivity and Quality Management, 17*(2), 213–228. https://doi.org/10.1504/IJPQM.2016.075016
23. Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications, 38*(10), 12983–12990. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.097
24. 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

25. Rezaee, M. J., Salimi, A., & Yousefi, S. (2017). Identifying and managing failures in the stone processing industry using cost-based FMEA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88*(9–12), 3329–3342. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8940-2
26. Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega, 53*, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009
27. Sakthivel, G., & Ikua, B. W. (2017). FMEA using fuzzy AHP and GRA-TOPSIS. *International Journal of Productivity and Quality Management, 22*(4), 466–484. https://doi.org/10.1504/IJPQM.2017.083049
28. 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, 24*(3), 398–423. https://doi.org/10.1504/IJPQM.2018.090875
29. Sumasto, F., Nugroho, Y. A., Solih, E. S., Arohman, A. W., Agustin, D., & Permana, A. K. (2024). Enhancing quality control in the Indonesian automotive parts industry through FMEA and MSA. *Instrumentation Mesure Métrologie, 23*(1), 43–53. https://doi.org/10.18280/i2m.230105
30. Tadić, D., Marinković, D., & Komatina, N. (2025). 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/10.1177/1748006X251361955
31. Tian, Z. P., Wang, J. Q., & Zhang, H. Y. (2018). An integrated approach for FMEA based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. *Applied Soft Computing, 72*, 636–646. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.08.015
32. Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., & Baghery, M. (2018). HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach. *Safety Science, 102*, 144–158. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.010
33. Yucesan, M., Gul, M., & Celik, E. (2021). A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best-worst method. *Complex & Intelligent Systems, 7*, 1547–1564. https://doi.org/10.1007/s40747-021-00279-3

References [In Persian]

1. Masoumbeigi, H., Matlabi Pikani, D., Ghanizadeh, G., Akbari Jour, H., & Esmaeili, M. (2024). Hazard identification and assessment in a battery manufacturing industry using FMEA and estimating the cost ratio of accident occurrence to prevention. *Journal of Health and Environment, 16*(4), 787–804. [In Persian]
2. Mashayekhi, A., Farhangi, A.-A., Momeni, M., & Alidousti, S. (2021). Investigating the key factors affecting the application of information technology in Iranian governmental organizations: Application of the Delphi method. *Iranian Management Research, 9*(20), 191–239. [In Persian]
3. Rashidi, M., Moghli, A., & Rasouli, R. (2014). Designing a model for enhancing the organizational retention of knowledge-based employees: Using the Delphi

technique. *Journal of Career and Organizational Counseling*, *6*(21), Article e99373. [In Persian]

4. Ravanestan, K., Aghajani, H., Safaei Ghadikolaei, A., & Yahyazadehfar, M. (2017). Identifying and weighting resilience strategies in the Iran Khodro supply chain. *Industrial Management Perspective*, *7*(1), 145–172. [In Persian]
5. Seyamian, N., Nasirahmadi, K., & Ehsani Amraei, R. (2021). Health, safety, and environmental risk assessment in the automotive industry based on FTA and FMEA methods. *Journal of Environmental Research and Technology, 5*(8), 139–159. https://www.magiran.com/p2295853 [In Persian]

استناد به این مقاله: کاظمی، مصطفی.، سیرانی، سبا.، ناجی عظیمی، زهرا. (۱۴۰۵). شناسایی و اولویت‌بندی حالات شکست با استفاده رویکرد بهترین-بدترین فازی و ویکورفازی در صنعت قطعه‌سازی خودرو، *مدیریت صنعتی، ۲۴(۸۱)*، ۱۴۵-۱۷۹. DOI: 10.22054/jims.2026.92279.3024

Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.