

Paper Type: Original Article



Improving Equipment Effectiveness through Integrating Design and Process Failure Mode Analysis in the Automotive Industry

Mojtaba Yarahmadi^{1,*}, Mohammad Rasouli¹

¹ Department of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; mo.yarahmadi@ut.ac.ir; mhrsana@gmail.com.

Citation:



Yarahmadi, M., & Rasouli, M. (2026). Improving equipment effectiveness through integrating design and process failure mode analysis in the automotive industry. *Management: Modeling, Analysis and Applications*, 3(3), 149-159.

Received: 22/12/2025

Reviewed: 11/04/2026

Revised: 25/05/2026

Accepted: 16/07/2026

Abstract

Purpose: Improving equipment productivity and reducing production waste are critical objectives in the automotive industry. Design Failure Mode and Effects Analysis (DFMEA) and Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA) are widely recognized as preventive tools for identifying and mitigating potential risks. However, these approaches are often implemented independently, and their combined impact on equipment performance has received limited attention. Therefore, this study aims to investigate the role of integrating design and process failure mode analysis in improving Overall Equipment Effectiveness (OEE) and reducing production failures in the automotive industry.

Methodology: This applied research adopts a case study approach in the press shop of an automotive manufacturing company. Initially, OEE was measured over a four-week period to establish baseline performance. Production processes were then analyzed, and potential failure modes in both design and manufacturing processes were identified through expert participation. Severity, occurrence, and detection ratings were assigned to each failure mode, and Risk Priority Numbers (RPNs) were calculated. Corrective actions were subsequently developed and implemented for high-priority risks at both design and process levels. Finally, OEE was remeasured and compared with the baseline results.

Findings: The results identified 75 potential failure modes, including 70 process-related failures and 5 design-related failures. Following the implementation of corrective actions, a substantial proportion of high-priority risks was reduced, and several failures originating from product design were successfully addressed. Performance evaluation showed that OEE increased from 60% to 65%, while production scrap decreased by approximately 6%. The findings further revealed that some process failures originate from design deficiencies and cannot be effectively eliminated without corresponding design improvements.

Originality/Value: This study proposes an integrated perspective by simultaneously examining DFMEA, PFMEA, and OEE within a unified framework for quality and productivity improvement. Its primary contribution lies in demonstrating the interrelationship between design risks, process risks, and equipment performance, which have largely been investigated separately in prior studies. The findings provide practical guidance for manufacturing organizations seeking to strengthen preventive quality management systems, reduce rework, and enhance equipment effectiveness.

Keywords: FMEA, PFMEA, DFMEA, OEE.



Corresponding Author: mo.yarahmadi@ut.ac.ir



<https://doi.org/10.22105/mmaa.vi.133>



Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



۶

نوع مقاله: پژوهشی

بهبود اثربخشی تجهیزات تولید از طریق یکپارچه سازی تحلیل حالات شکست طراحی و فرایند در صنعت خودروسازی

مجتبی یار احمدی^۱، محمد رسولی^۱
^۱گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

هدف: افزایش بهره‌وری تجهیزات و کاهش ضایعات از اهداف کلیدی صنایع خودروسازی به‌شمار می‌رود. در این راستا، تحلیل حالات شکست و آثار آن در طراحی^۱ و فرایند به‌عنوان دو ابزار مهم پیشگیرانه برای شناسایی و کنترل ریسک‌های بالقوه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، در بسیاری از سازمان‌ها DFMEA و تحلیل حالات شکست فرایند^۲ به‌صورت مستقل اجرا می‌شوند و تأثیر متقابل آن‌ها بر عملکرد تجهیزات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش یکپارچه‌سازی DFMEA و PFMEA در بهبود اثربخشی کلی تجهیزات^۳ و کاهش خطاهای تولید در صنعت خودروسازی انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش: این پژوهش از نوع کاربردی و مبتنی بر مطالعه موردی در سالن پرس یک شرکت خودروسازی است. ابتدا میزان OEE به‌عنوان شاخص پایه عملکرد در یک دوره چهار هفته‌ای اندازه‌گیری شد. سپس فرایندهای تولیدی مورد بررسی قرار گرفت و با مشارکت خبرگان، حالات بالقوه شکست در طراحی و فرایند شناسایی شدند. برای هر حالت شکست، شدت، احتمال وقوع و قابلیت کشف تعیین و عدد اولویت ریسک^۴ محاسبه شد. پس از اولویت‌بندی ریسک‌ها، اقدامات اصلاحی برای خطاهای بحرانی در دو سطح طراحی و فرایند تدوین و اجرا گردید. در نهایت، شاخص OEE مجدداً اندازه‌گیری و نتایج قبل و بعد از مداخله مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد ۷۵ حالت بالقوه شکست در فرایند تولید شناسایی شد که ۷۰ مورد به فرایند تولید و ۵ مورد به طراحی محصول مرتبط بودند. پس از اجرای اقدامات اصلاحی، بخش قابل توجهی از ریسک‌های با اولویت بالا کاهش یافت و برخی از خطاهایی که منشا آن‌ها در طراحی محصول بود نیز اصلاح شدند. نتایج ارزیابی عملکرد نشان داد شاخص OEE از ۶۰٪ به ۶۵٪ افزایش یافته و میزان ضایعات نیز حدود ۶٪ کاهش پیدا کرده است. یافته‌ها همچنین نشان دادند بخشی از مشکلاتی که در مرحله تحلیل فرایند مشاهده می‌شوند، ریشه در طراحی محصول دارند و بدون اصلاح آن‌ها امکان دستیابی به بهبود پایدار در عملکرد تجهیزات وجود ندارد.

اصالت/ارزش افزوده علم: این پژوهش با بررسی هم‌زمان DFMEA، PFMEA و شاخص OEE، چارچوبی یکپارچه برای بهبود کیفیت و بهره‌وری در محیط‌های تولیدی ارائه می‌کند. ارزش افزوده اصلی مطالعه در تبیین ارتباط میان ریسک‌های طراحی، ریسک‌های فرایندی و عملکرد تجهیزات است؛ موضوعی که در مطالعات پیشین عمدتاً به‌صورت مستقل بررسی شده است. نتایج پژوهش می‌تواند به مدیران صنایع تولیدی در طراحی نظام‌های پیشگیرانه کنترل کیفیت، کاهش دوباره کاری‌ها و ارتقای بهره‌وری تجهیزات کمک کند.

کلیدواژه‌ها: FMEA، PFMEA، DFMEA، OEE.

۱- مقدمه

تجزیه و تحلیل اثر حالت شکست^۵ یکی از روش‌های معتبر ارزیابی ریسک است که برای نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ در صنعت هوافضا به‌کار گرفته شد و اکنون به‌طور گسترده و موثر در صنایع خودروسازی برای تجزیه و تحلیل ریسک و تحلیل ریشه‌ای خرابی سیستم‌های نگهداری و تعمیرات

^۱ Design Failure Mode and Effects Analysis (DFMEA)

^۲ Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA)

^۳ Overall Equipment Effectiveness (OEE)

^۴ Risk Priority Number (RPN)

^۵ Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

استفاده می شود. پیش بینی و حذف عیوب (شکست ها) بالقوه در طول فرایند تولید بسیار اهمیت دارد، زیرا خرابی ها می توانند کیفیت محصول را کاهش دهند و منجر به تاخیر در تولید به دلیل نیاز به کار مجدد یا اضافی شوند که این خود باعث ایجاد هزینه های اضافی می شود. برای اینکه شرکت ها در بازار رقابتی باقی بمانند، لازم است سیستم های فعال را برای جلوگیری از شکست ها نصب کنند. طبق استانداردهای *ISO 9000* و *ISO/TS 16949*، بهترین تجزیه و تحلیل طبقه بندی شده برای پیشگیری از خرابی ها در طول فرایند تولید، حالت شکست فرایند و تحلیل اثر *PFMEA* است. در شرکت های خودروسازی تجزیه و تحلیل اثر حالت شکست *PFMEA* به عنوان ابزاری اساسی برای مهندسی قابلیت اطمینان و کنترل فرایند با هدف بررسی ریسک های احتمالی و جلوگیری از تکرار ایرادات استفاده می شود. با داشتن بانک اطلاعاتی مناسب *PFMEA* و یکپارچه سازی آن با تجزیه و تحلیل اثر حالت شکست طراحی *DFMEA*، می توان طراحی محصول را بهبود بخشید به گونه ای که نتایج اقدامات در *PFMEA* به طور کامل قابل پایش باشد. در نتیجه با پیش بینی و حذف عیوب بالقوه در حین کار کیفیت محصول حفظ شده و از تاخیر در تولید و هزینه های اضافی جلوگیری شود و با بهره گیری از نرخ کیفیت محصولات تولید شده، نرخ عملکرد دستگاه و نرخ در دسترس بودن دستگاه، اتلاف های مربوط به ماشین آلات شناسایی شده و موجب کاهش ضایعات و بهبود شاخص کلیدی *OEE* می شود.

۲- مرور ادبیات

در زمینه بهبود کیفیت فرایند، پژوهشگران با موفقیت از تحلیل حالات خرابی و اثرات در صنایع مختلف استفاده کرده اند. به عنوان مثال، بهار ساکاده و همکاران [1] از *FMEA* در یک شرکت تولیدکننده ذرت استفاده کردند تا حالت های خرابی احتمالی را شناسایی کنند. آن ها اقدامات اصلاحی پیشنهاد دادند که منجر به افزایش بهره وری و کارایی شد. جامع و پیشگیرانه بودن *FMEA* همراه با چندکاره بودن آن، این روش را به انتخابی محبوب برای سازمان هایی تبدیل کرده است که به دنبال بهبود قابلیت اطمینان، ایمنی و کیفیت محصولات هستند. کوپین و ویدرا [2] در مطالعه خود، تحقیقی را با هدف استفاده از روش های کمی در زمینه بازرسی در حین خدمت انجام دادند و آن ها را به روش *FMEA* به کار بردند. به عبارت ساده تر، مطالعه آن ها بر استفاده از روش های ریاضی و آماری برای بهبود فرایند بازرسی و نگهداری تجهیزات یا سیستم های در حال استفاده، با تاکید ویژه بر تحلیل و درک حالت های خرابی احتمالی، اثرات آن ها و میزان بحرانی بودن آن ها در این سیستم ها متمرکز بود. این پژوهش به دنبال بهبود اثربخشی و قابلیت اطمینان شیوه های نگهداری و بازرسی در صنایع مختلف بود. شری هاری و سرینیواسان [3] کاربرد *FMEA* در شناسایی ریسک، برنامه ریزی کاهش ریسک و نقش آن در بهبود قابلیت اطمینان محصولات خودرویی را با تاکید بر نیاز به روشی ساختاریافته برای بهبود تحقیقات در کاربرد خودرو بیان کردند. فابیس-دوماگالا و همکاران [4] استفاده از تحلیل ماتریسی و روش های آماری برای انجام تجزیه و تحلیل علت ریشه ای^۱ و طبقه بندی خرابی های احتمالی در پمپ را پیشنهاد دادند. این روش توسعه ای از *FMEA* ماتریسی است و به محدودیت های *FMEA* می پردازد و جایگزینی برای تحلیل ریسک بر اساس *RPN* ارائه می دهد. لیو و همکاران [5] روش ارزیابی ریسک *FMEA* برای محیط های نامطمئن را پیشنهاد دادند که به عدم قطعیت دانش انسانی می پردازد. در زمینه بهبود کیفیت فرایند، استفاده از تحلیل حالات خرابی و اثرات در فرایند به عنوان یک ابزار موثر در صنایع مختلف شناخته شده است. این روش به سازمان ها کمک می کند تا حالت های خرابی را در مراحل اولیه طراحی و در فرایندهای تولید شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه ای را برای کاهش قابل توجه احتمال وقوع خرابی ها یا افزایش احتمال کشف حالت خرابی مرتبط با یک علت خاص انجام دهند. از طرفی *PFMEA* یک اقدام پیشگیرانه برای اطمینان از کیفیت با تشخیص شدت خرابی، احتمال وقوع و تشخیص خرابی و در نهایت اولویت بندی خرابی ها و تلاش برای بهبود کیفیت محصولات تولیدی است. به گفته دیتمن و همکاران [6] روش *PFMEA* منجر به اطلاعات دقیق در مورد محصولات، فرایندها و سیستم ها در یک سازمان می شود. بنابراین، این روش منبع ارزشمندی از اطلاعات و دانش است که می تواند پشتیبانی فنی برای شناسایی نقاط ضعف در طراحی، کاهش هزینه ها در طول چرخه عمر محصول و کاهش تغییرات در مرحله تولید را فراهم کند [7]. به دلیل این مزایا، تعداد زیادی از تحقیقات در مورد *OEE* استفاده از روش *PFMEA* برای حل مشکلات مختلف منتشر شده اند. به عنوان مثال، شارما و شارما [8] *FMEA*، *RCA* و تکنیک های فازی را برای درک رفتار خرابی سیستم به منظور برنامه ریزی استراتژی های نگهداری مناسب به کار بردند. از *RCA* برای طبقه بندی جامع علل مربوط به خرابی یک دستگاه کارخانه کاغذسازی استفاده شد، در حالی که *FMEA* برای کمی کردن منابع غیرقابل اطمینان استفاده شد. تکنیک های فازی برای کاهش اختلافات مرتبط با رتبه بندی ریسک *FMEA* مورد استفاده قرار گرفت و بسیاری از کارشناسان با درجات مختلف شایستگی در تعیین تابع عضویت مشارکت داشتند. بوجنا و همکاران [9] یک مدل جدید هیبریدی *PFMEA-DEMATEL-ERP* برای مدیریت حالت های خرابی جهت کاهش اثرات اقتصادی خرابی ها در یک فرایند پرس انتقالی ارائه کردند. مدل

¹ Root Cause Analysis (RCA)

DEMATEL و ERPN محدودیت‌های PFMEA را برطرف کرد و معیارهایی مانند وقوع محصولات معیوب و احتمال وقوع آن‌ها O و RPN مورد بررسی قرار گرفتند. سیکوک و حمیدی [10] PFMEA را در صنعت هوانوردی برای بررسی مدیریت ریسک‌های تامین‌کننده اجرا کردند.

در ادامه این بحث، یکی از ابزارهای مهم در بهبود کارایی و بهره‌وری فرایند، استفاده از شاخص OEE است. OEE یک معیار جامع است که به سازمان‌ها کمک می‌کند تا عملکرد تجهیزات را با تمرکز بر بهره‌وری، کیفیت و دسترسی ارزیابی کنند. یولاه و همکاران [11] به نقش محوری OEE به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری عملکرد حیاتی برای بهبود کارایی عملیاتی می‌پردازد. در این مطالعه تحلیل جامعی از هر جزء از OEE ارائه می‌شود که اهمیت اندازه‌گیری و بهبود این جنبه‌ها در هر محیط عملیاتی را برجسته می‌کند. از طریق مطالعات موردی عملی و مثال‌های دنیای واقعی، این مقاله نشان می‌دهد که چگونه سازمان‌ها می‌توانند از قدرت OEE برای شناسایی حوزه‌های بهبود استفاده کنند و استراتژی‌های هدفمند برای عملکرد بهتر را اجرا نمایند. همچنین بررسی می‌کند که چگونه OEE می‌تواند زبان‌های پنهان را کشف کرده، زمان توقف را کاهش داده و بهبودهای کیفیت را هدایت کند که در نهایت منجر به افزایش بهره‌وری و سودآوری می‌شود. بهترین روش‌ها برای اجرای OEE بررسی و اندازه‌گیری آن می‌پردازد و بر اهمیت جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و بهبود مستمر تأکید می‌کند. همچنین به چالش‌ها و مشکلات احتمالی که سازمان‌ها ممکن است هنگام پذیرش OEE به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری عملکرد با آن مواجه شوند، پرداخته می‌شود. جینسته و همکاران [12] ابتدا اهمیت انعطاف‌پذیری در اندازه‌گیری اثربخشی تجهیزات را برای تسهیل سفارشی‌سازی و بهبود مداوم یک سیستم تولید بررسی می‌کردند. سپس چارچوب اندازه‌گیری برای شاخص OEE شامل انعطاف OEE را معرفی کردند که بر اساس سه شاخص اصلی، یعنی حرکت‌پذیری، یکنواختی و دامنه، استوار است. پیوندهایی به چارچوب‌های اندازه‌گیری OEE فعلی ایجاد کردند و رویکرد به‌سوی شاخص جدید از یک فهرست طولانی از زبان‌ها و متغیرها آغاز شد و روش‌های محتمل محاسبه برای ارزش‌های شاخص مورد بررسی قرار گرفت. برخی حالت شکست فرایندی $PFMEA$ و OEE علت آن $DFMEA$ می‌باشد که حذف نمی‌شوند و به $PFMEA$ و OEE منتقل می‌شود اگر تغییرات احتمالی در طراحی شناسایی نشود ممکن است خطر فرایند را کاهش ندهد و سپس $DFMEA$ دوباره درگیر شود شاخص OEE کاهش یابد.

یکی از محدودیت‌های موجود در مطالعات پیشین این بود که $PFMEA$ ، $DFMEA$ و OEE به‌صورت مجزا بررسی شده‌اند، درحالی‌که مفیدتر است این سه را به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق، قصد داریم $PFMEA$ ، $DFMEA$ و OEE را به‌صورت هم‌زمان بررسی کنیم. از آنجایی‌که تغییرات ایجادشده در $DFMEA$ می‌تواند بر OEE و $PFMEA$ تأثیرگذار باشد و بالعکس، بررسی هم‌زمان این سه مفهوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. $DFMEA$ به شناسایی و تحلیل خطاهای بالقوه در طراحی و $PFMEA$ به شناسایی و تحلیل خطاهای بالقوه در فرایندهای تولید می‌پردازد و اقداماتی را برای کاهش این خطاها پیشنهاد می‌کند. OEE نیز به اندازه‌گیری کارایی و بهره‌وری تجهیزات تولیدی پرداخته و شامل سه عامل اصلی زمان بهره‌برداری، عملکرد و کیفیت است. با بررسی هم‌زمان این سه ابزار، می‌توانیم تأثیرات متقابل آن‌ها را بهتر درک کنیم و به بهبود کلی فرایندها و تجهیزات تولیدی دست یابیم.

۳- روش پژوهش

برای انجام این تحقیق، ابتدا سه تیم تشکیل شد: یک تیم برای اندازه‌گیری OEE ، یک تیم برای طراحی و پیاده‌سازی $PFMEA$ و یک تیم برای پیاده‌سازی ایرادات ارجاع‌شده از $PFMEA$ به $DFMEA$. سپس کلیه فعالیت‌های مرتبط با فرایندهای تولیدی کارخانه و مشارکت صاحبان فرایندها مشخص گردید. در قالب جلسات کارشناسانه و حضور در محیط تولیدی، فرایند کامل تولید قطعات خودرو در کارخانه پرس که ابتدایی‌ترین قسمت فرایند تولید خودرو می‌باشد، مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

پس از آموزش‌های لازم در خصوص محاسبات OEE ، $PFMEA$ و $DFMEA$ ، در مرحله بعدی و هم‌زمان با استخراج فرایندهای تولیدی، میزان OEE برای تجهیزات مختلف تولیدی در طول چهار هفته (حدود یک ماه) و به‌صورت بازه‌های زمانی یک هفته‌ای به‌عنوان پیش‌آزمون استخراج گردید. سپس در فاز بعدی پژوهش، در مدت یک ماه کاری، انواع خطاهای احتمالی و شکست‌هایی که بر کمیت و کیفیت محصول و خروجی‌های فرایندها تأثیر داشتند، توسط همان تیم تخصصی شناسایی شد.

در گام بعدی، در جلسات تخصصی با تیم‌های کاری شامل کارشناسان و مدیران سازمان، باتوجه به آثار خطاها، سه شاخص شدت خطا، احتمال وقوع خطا و احتمال کشف خطا با توافق جمعی برای هر حالت خطا به‌صورت مقیاس‌های کلامی استخراج شد. سپس این مقیاس‌ها به اعداد فازی

مثلی تبدیل و دفازی شده و نمره اولویت خطرپذیری خطاها RPN تعیین گردید. در ادامه، با استفاده از ماتریس شدت وقوع و جدول اولویت بندی خطاها، خطاهایی که نیاز به اقدامات اصلاحی داشتند مشخص شد.

در مرحله بعد، میزان OEE قبل از پیاده سازی اقدامات اصلاحی اندازه گیری شد و سپس پس از پیاده سازی راهکارها، به عنوان پیش آزمون در بازه های زمانی یک هفته ای و در طول همان چهار هفته کاری مجدداً محاسبه شد. پس از پیاده سازی $DFMEA$ و اطمینان از پیاده سازی کامل $PFMEA$ ، مشخص گردید برخی خطاهای با اولویت بالا با رعایت تمامی اقدامات اصلاحی همچنان باقی می باشند. این ایرادات مرتبط با طراحی و $DFMEA$ باید مرتفع می شد. پس از شناسایی خطاها و اعلام آن ها، بازطراحی انجام شد و با انجام اقدامات مشخص شده در بازطراحی و آزمون مجدد در بازه زمانی چهار هفته، مشخص گردید عدد RPN در ایرادات مرتبط با $PFMEA$ به شکل قابل توجهی کاهش یافته و پس از اندازه گیری شاخص OEE طبق شکل ۱، نسبت به قبل بهبود داشته است.

سطح دسترسی (Availability)	کل زمان (A)	
	زمان در دسترس (B)	خرابی و تنظیمات
عملکرد (Performance)	زمان تولید (C)	
	تولید واقعی (D)	توقف کوتاه و کاهش سرعت
کیفیت (Quality)	کل تولید (E)	
	تولید سالم (F)	ضایعات و دوباره کاریها
$OEE = \frac{B}{A} * \frac{D}{C} * \frac{F}{E}$		

شکل ۱- نحوه محاسبه شاخص OEE .

Figure 1- How the OEE index is calculated.

۱-۳- علامت گذاری تعیین RPN

در صنعت خودرو، احتمال اینکه دو حالت شکست با RPN یکسان داشته باشند اما از نظر شدت متفاوت باشند وجود دارد. این وضعیت می تواند منجر به انتخاب نامناسب برنامه های اقدام برای حالت های شکست بحرانی شود. به همین دلیل، استفاده از RPN به عنوان تنها شاخص برای ارزیابی ریسک نباید صورت گیرد. برای داشتن یک تصویر کامل تر از ریسک ها و اولویت بندی آن ها، از شاخص های دیگری مانند شدت (S)، وقوع (O) و تشخیص (D) نیز استفاده می شود.

ارزیابی ریسک با توجه به رتبه بندی های شدت، وقوع و تشخیص نشان می دهد که استفاده از RPN به تنهایی کافی نیست. تیم ها باید در کنار RPN ، رتبه بندی های شدت، وقوع و تشخیص را نیز به طور مستقل و با بحث و بررسی تیمی برای اولویت بندی ریسک ها در نظر بگیرند. با این حال، در صورت وجود تعداد زیادی از حالت های خرابی در $FMEA$ ، این فرایند ممکن است تیم را با بار کاری زیادی روبه رو سازد و منجر به بحث های طولانی و بی پایان برای تعیین نیازمندی های اقدام اصلاحی شود.

برای رفع این مشکل، از ماتریس ریسک برای ترکیب معیارهای RPN ، شدت، وقوع و تشخیص استفاده شده است. یکی از روش های موثر، ترکیب این معیارها در یک ماتریس ریسک است که می توان با ترکیب شدت و وقوع، ماتریسی شامل نشانگرهای رنگی ایجاد کرد. این ماتریس می تواند به صورت زیر باشد.

جدول ۱- عنوان سطوح ریسک بر اساس شدت، وقوع و قابلیت کشف.

Table 1- Risk level designations based on severity, occurrence, and detectability.

Risk Level (S*O*D)	
None	0
Low	8-60
Medium	60-120
High	120-300

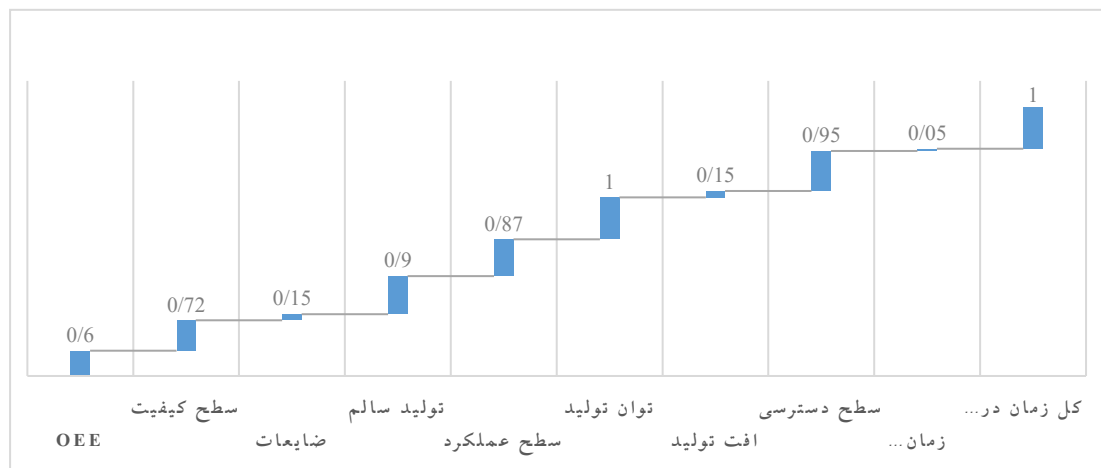
قرمز: نشان دهنده خطراتی است که باید از بین برده یا کاهش یابد و نیاز به اقدام اصلاحی دارند.

زرد: نشان‌دهنده خطراتی است که کاهش آن‌ها توصیه می‌شود اما اجباری نیست و برخی موارد نیاز به اقدام اصلاحی دارد.

سبز: نشان‌دهنده ریسک‌های قابل قبول.

۴- یافته‌های تحقیق

برای محاسبه OEE به‌عنوان پیش‌آزمون جهت تعیین وضعیت قبل از مداخلات در خودروسازی، ابتدا میزان OEE در طول چهار هفته کاری، به‌صورت روزانه استخراج و میانگین آن‌ها به‌صورت هفتگی محاسبه شد. در نهایت، میانگین OEE در مجموع چهار هفته مورد مطالعه مشخص گردید (شکل ۲).



شکل ۲- میانگین OEE به‌عنوان پیش‌آزمون در چهار هفته‌ی قبل از مداخلات.
Figure 2- Average OEE as a pre-test during the four weeks prior to the interventions.

همچنان‌که در نمودار فوق مشاهده می‌شود، میزان OEE به‌عنوان پیش‌آزمون در مجموع چهار هفته اول ۶۰٪ می‌باشد. شایان ذکر است این عدد در سطح اثربخشی تجهیزات در صنایع خودروسازی در حد متوسط می‌باشد.

تعیین راهکارهای کاهش یا حذف خطاهای اولویت‌دار و پیاده‌سازی آن‌ها در فرایند تولید پس از اولویت‌بندی خطاهای فرایند تولید، باتوجه‌به درخت تحلیل خطا برای کاهش یا حذف خطاهای موجود در فرایندها، پیشنهاد و راهکارهای اصلی و قابل اجرا اولویت‌بندی شدند. خطاهای کشف‌شده و راهکارهای پیشنهادی حذف خطاها به شرح زیر می‌باشد:

شناسایی خطاهای موجود در فرایندهای تولیدی با مرور دقیق نقشه فرایندها و بررسی آن‌ها در جلسات تخصصی، تعداد ۷۵ خطای بالقوه در فرایند تولید خودرو (سالن پرس) استخراج گردید که از این ۷۵ خطا، ۷۰ خطا مربوط به شکست فرایند PFMEA و ۵ خطا مربوط به DFMEA می‌باشد.

جدول ۲- عنوان حالات بالقوه شکست شناسایی‌شده و مقادیر RPN.

Table 2- List of identified potential failure modes and RPN values.

ردیف	زیرفرایند	خطای بالقوه	کد خطا	RPN
۱	مغایرت ابعادی	ضایع شدن قطعه	F1	120
2	نیش و قری	قطعه نامنطبق	F2	56
3	اثر Scrap روی قطعه	قطعه نامنطبق	F3	190
4	دفرمگی قری بازکاری	ضایع شدن قطعه	F4	56
5	پلیسه	ایجاد نیش و قری در مراحل بعدی	F5	105
6	دفرمگی	نامنطبق شدن قطعه	F6	84
7	پلیسه	ایجاد نیش و قری در مراحل بعدی	F7	84
8	برگشت لبه	ایجاد خرابی در ایستگاه‌های بعدی	F8	126
9	نیش و قری	نامنطبق شدن قطعه	F9	84
10	کسری لبه	قطعه نامنطبق	F10	126

جدول ۲- ادامه.

Table 2- Continued.

ردیف	زیر فرایند	خطای بالقوه	کد خطا	RPN
11	عدم تریم کامل	قطعه نامنطبق	F11	84
12		قطعه نامنطبق	F12	126
13	نیش و قری	نامنطبق شدن قطعه	F13	105
14	عدم پانچ کامل	قطعه نامنطبق	F14	84
15		قطعه نامنطبق	F15	126
16	مغایرت ابعادی	ضایع شدن قطعه	F16	120
17	دفرمگی قری بازکاری	ضایع شدن قطعه	F17	112
18	پلیسه	ایجاد نیش و قری در مراحل بعدی	F18	105
19	دفرمگی	نامنطبق شدن قطعه	F19	84
20		نامنطبق شدن قطعه	F20	84
21	برگشت لبه	ایجاد خرابی در ایستگاه های بعدی	F21	126
22		نامنطبق شدن قطعه	F22	126
23	اثر Scrap روی قطعه	قطعه نامنطبق	F23	84
24	عدم تریم کامل	قطعه نامنطبق	F24	84
25		ضایع شدن قطعه	F25	126
26	نیش و قری	نامنطبق شدن قطعه	F26	105
27	عدم پانچ کامل	قطعه نامنطبق	F27	84
28		ضایع شدن قطعه	F28	126
29	مغایرت ابعادی	ضایع شدن قطعه	F29	190
30	داغی و پارگی	ضایع شدن قطعه	F30	168
31	پلیسه	ضایع شدن قطعه	F31	112
32	دوبل شدگی	ضایع شدن قطعه	F32	112
33		ضایع شدن قطعه	F33	190
34	چروک	نامنطبق شدن قطعه و در برخی مواقع ضایع شدن قطعه	F34	168
35		ایجاد خرابی در ایستگاه های بعدی	F35	112
36	کسری لبه	ضایع شدن قطعه	F36	112
37		ضایع شدن قطعه	F37	168
38	دفرمگی	نامنطبق شدن قطعه	F38	126
39		ایجاد خرابی در ایستگاه های بعدی	F39	84
40	برگشت لبه	ایجاد خرابی در ایستگاه های بعدی	F40	126
41	موج	نامنطبق شدن قطعه	F41	126
42		قطعه نامنطبق	F42	84
43	عدم فلنج کامل	قطعه نامنطبق	F43	126
44		قطعه نامنطبق	F44	84
45	خط و خش	نامنطبق شدن قطعه	F45	126
46		نامنطبق شدن قطعه	F46	84
47	نیش و قری	نامنطبق شدن قطعه	F47	105
48	عدم کوبش کامل	قطعه نامنطبق	F48	126
49		قطعه نامنطبق	F49	84
50	مغایرت ابعادی	ضایع شدن قطعه	F50	120
51	داغی و پارگی	ضایع شدن قطعه	F51	168
52		ضایع شدن قطعه	F52	112
53	دوبل شدگی	ضایع شدن قطعه	F53	112
54		ضایع شدن قطعه	F54	112

جدول ۲- ادامه.
Table 2 – Continued.

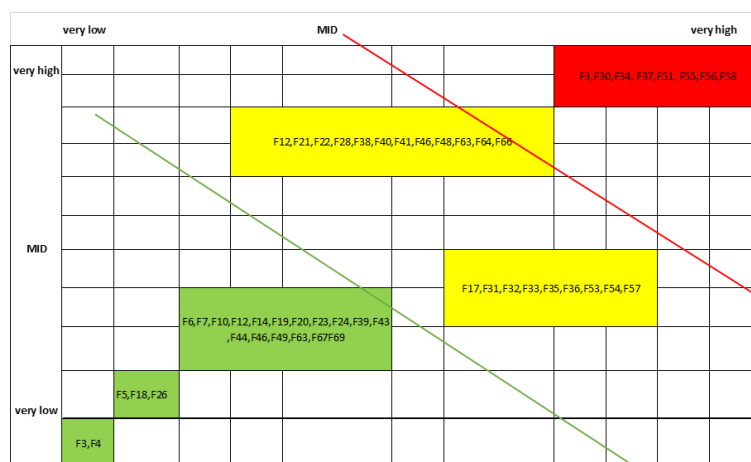
RPN	کد خطا	خطای بالقوه	زیرفرایند	ردیف
168	F55	نامنطبق شدن قطعه و در برخی مواقع ضایع شدن قطعه	چروک	55
168	F56	نامنطبق شدن قطعه و در برخی مواقع ضایع شدن قطعه		56
112	F57	ضایع شدن قطعه	کسری لبه	57
168	F58	ضایع شدن قطعه		58
126	F59	نامنطبق شدن قطعه	دفرمگی	59
84	F60	نامنطبق شدن قطعه		60
126	F61	ایجاد خرابی در ایستگاه‌های بعدی	برگشت لبه	61
126	F62	نامنطبق شدن قطعه	موج	62
84	F63	نامنطبق شدن قطعه		63
126	F64	قطعه نامنطبق	عدم فلنج کامل	64
84	F65	قطعه نامنطبق		65
126	F66	نامنطبق شدن قطعه	خط و خش	66
84	F67	نامنطبق شدن قطعه		67
105	F68	نامنطبق شدن قطعه	نیش و قری	68
84	F69	نیاز به بازکاری	دفرمگی	69
84	F70	نیاز به بازکاری	زنگ‌زدگی و شوره‌زدگی	70

همچنان که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، تعداد ۸ خطای زیر در منطقه اولویت با ریسک بالا قرار گرفتند، $F3, F30, F34, F37, F51, F55$:
 $F56, F58$ تعداد ۲۱ خطا با ریسک متوسط و تعداد ۴۱ خطا نیز با ریسک کم در اولویت قرار دارند.

خطاهای با ریسک متوسط شامل، $F12, F21, F22, F28, F38, F40, F41, F46, F48, F63, F64, F66, F17, F31, F32, F33, F35, F36$:
 $F53, F54, F57$

خطاهای با ریسک کم شامل، $F6, F7, F10, F12, F14, F19, F20, F23, F24, F39, F43, F44, F46, F49, F63, F67, F69, F5, F18$:
 $F26, F3, F4$ می‌باشند.

از ریسک‌های بالا، تعداد ۳ ریسک $F3, F30, F34$ مربوط به حالت شکست طراحی $DFMEA$ و بقیه خطاها مربوط به فرایند داخلی $PFMEA$ می‌باشد. باتوجه به درجه اهمیت و اینکه سالن پرس اولین سالن فرایند تولید می‌باشد و مشتری سالن‌های بدنه، موتتاژ و رنگ می‌باشد، باید برای کلیه خطاها اقدامات اصلاحی تعریف شود.



شکل ۳- عنوان طبقه‌بندی حالات شکست بر اساس سطح ریسک.

Figure 1- Classification of failure modes based on risk level.

در گام بعدی، کاربرگ های PFMEA در برگیرنده مشخصات خطاهای فرایند تولید و راهکارهای پیشنهادی تکمیل گردید. با تقسیم مسئولیت میان واحدهای مختلف مرتبط با فرایند تولید، بیش از ۹۰٪ راهکارهای پیشنهادی در طول یک ماه کاری پیاده سازی و اجرا شدند.

جدول ۳- عنوان اقدامات اصلاحی پیشنهادی و مقادیر RPN.
Table 3- Proposed corrective actions and RPN values.

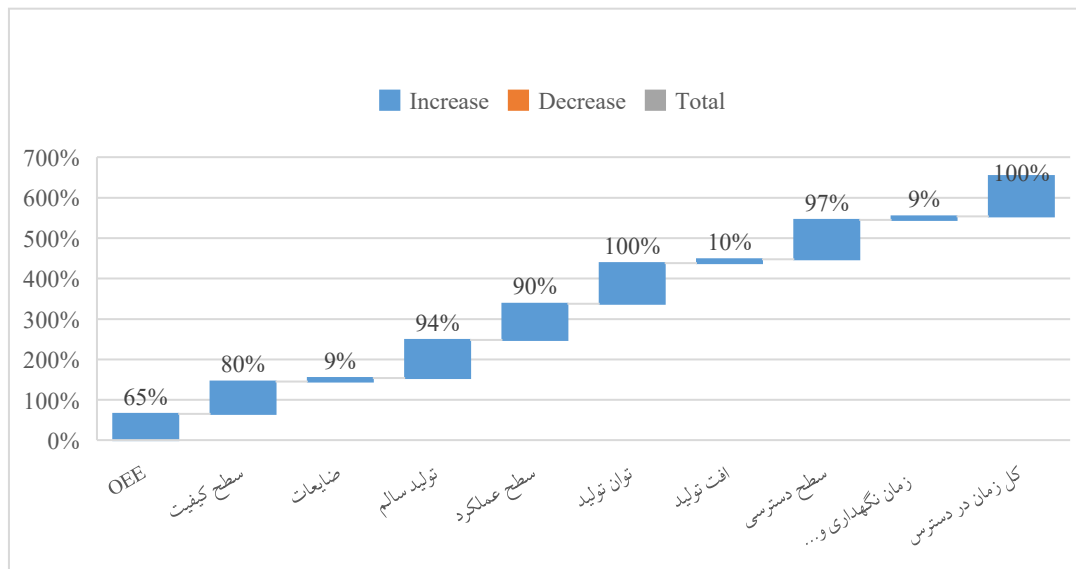
ردیف	زیر فرایند	راهکار پیشنهادی	کد خطا	RPN
۱	مغایرت ابعادی	اصلاح پرو فایل سطوح سنبه و ماتریس	F1	120
2	نیش و قری	قرارگیری مناسب بلنک یا قطعه در قالب	F2	56
3	اثر Scrap روی قطعه	تنظیم قرارهای قالب اعلام به سازنده جهت بازطراحی	F3	190
4	دفرمگی قری بازکاری	آب بندی مناسب قالب	F4	56
5	پلیسه	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه های برشی	F5	105
6	دفرمگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F6	84
7	پلیسه	آب بندی مناسب قالب	F7	84
8	برگشت لبه	آب بندی مناسب ورق گیر قالب	F8	126
9	نیش و قری	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه های برشی	F9	84
10	کسری لبه	تیز کردن لبه های برشی	F10	126
11	عدم تریم کامل	تیز کردن لبه های برشی	F11	84
12		تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F12	126
13	نیش و قری	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه های برشی	F13	105
14	عدم پانچ کامل	تیز کردن لبه های برشی	F14	84
15		تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F15	126
16	مغایرت ابعادی	اصلاح پرو فایل سطوح سنبه و ماتریس	F16	120
17	دفرمگی قری بازکاری	آب بندی مناسب قالب	F17	112
18	پلیسه	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه های برشی	F18	105
19	دفرمگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F19	84
20		آب بندی مناسب قالب	F20	84
21	برگشت لبه	آب بندی مناسب ورق گیر قالب	F21	126
22		تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه های برشی	F22	126
23	اثر Scrap روی قطعه	تیز کردن لبه های برشی	F23	84
24	عدم تریم کامل	تیز کردن لبه های برشی	F24	84
25		تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F25	126
26	نیش و قری	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه های برشی	F26	105
27	عدم پانچ کامل	تیز کردن لبه های برشی	F27	84
28		تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F28	126
29	مغایرت ابعادی	تنظیم قرارهای قالب اعلام به سازنده جهت بازطراحی	F29	190
30	داغی و پارگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F30	168
31	پلیسه	آب بندی مناسب ورق گیر قالب	F31	112
32		تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F32	112
33	دوبل شدگی	تنظیم قرارهای قالب اعلام به سازنده جهت بازطراحی	F33	190
34	چروک	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F34	168
35		آب بندی مناسب ورق گیر قالب	F35	112

جدول ۳- ادامه.
Table 3- Continued.

ردیف	زیرفرایند	راهکار پیشنهادی	کد خطا	RPN
36	کسری لبه	قرارگیری مناسب بلنک یا قطعه در قالب	F36	112
37		تنظیم قرارهای قالب	F37	168
38	دفرمگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F38	126
39		آب‌بندی مناسب قالب	F39	84
40	برگشت لبه	آب‌بندی مناسب ورق گیر قالب	F40	126
41	موج	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F41	126
42		آب‌بندی مناسب ورق گیر قالب	F42	84
43	عدم فلنج کامل	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F43	126
44		آب‌بندی مناسب سنبه و ماتریس فلنج قالب	F44	84
45	خط‌وخش	پولیش کاری مناسب سطوح قالب	F45	126
46		تنظیم مناسب لقی بین سنبه و ماتریس فلنج	F46	84
47	نیش و قری	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه‌های برشی	F47	105
48	عدم کوبش کامل	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F48	126
49		آب‌بندی مناسب سنبه و ماتریس کوبش	F49	84
50	مغایرت ابعادی	اصلاح پروفایل سطوح سنبه و ماتریس	F50	120
51	داغی و پارگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F51	168
52		آب‌بندی مناسب ورق گیر قالب	F52	112
53	دوبل‌شدگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F53	112
54		آب‌بندی مناسب ورق گیر قالب	F54	112
55	چروک	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F55	168
56		آب‌بندی مناسب ورق گیر قالب	F56	168
57	کسری لبه	قرارگیری مناسب بلنک یا قطعه در قالب	F57	112
58		تنظیم قرارهای قالب	F58	168
59	دفرمگی	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F59	126
60		آب‌بندی مناسب قالب	F60	84
61	برگشت لبه	آب‌بندی مناسب ورق گیر قالب	F61	126
62		تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F62	126
63	موج	آب‌بندی مناسب ورق‌گیر قالب	F63	84
64	عدم فلنج کامل	تنظیم مناسب پارامترهای پرس و قالب	F64	126
65		آب‌بندی مناسب سنبه و ماتریس فلنج قالب	F65	84
66	خط‌وخش	پولیش کاری مناسب سطوح قالب	F66	126
67		تنظیم مناسب لقی بین سنبه و ماتریس فلنج	F67	84
68	نیش و قری	تنظیم کلیرنس و تیز کردن لبه‌های برشی	F68	105
69	دفرمگی	رعایت مناسب الزامات دستورالعمل‌های مربوطه	F69	84
70	زنگ‌زدگی و شور‌زدگی	رعایت مناسب الزامات دستورالعمل‌های مربوطه	F70	84

محاسبه مجدد *OEE* به‌عنوان پس‌آزمون و تحلیل نتایج: بعد از پیاده‌سازی راهکارهای پیشنهادی، لازم بود از اثربخشی اقدامات و مداخلات انجام‌شده اطمینان حاصل شود. لذا جهت سنجش وضعیت جدید، از *OEE* به‌عنوان پس‌آزمون استفاده گردید و میزان *OEE* به مدت چهار هفته کاری مجدداً محاسبه شد.

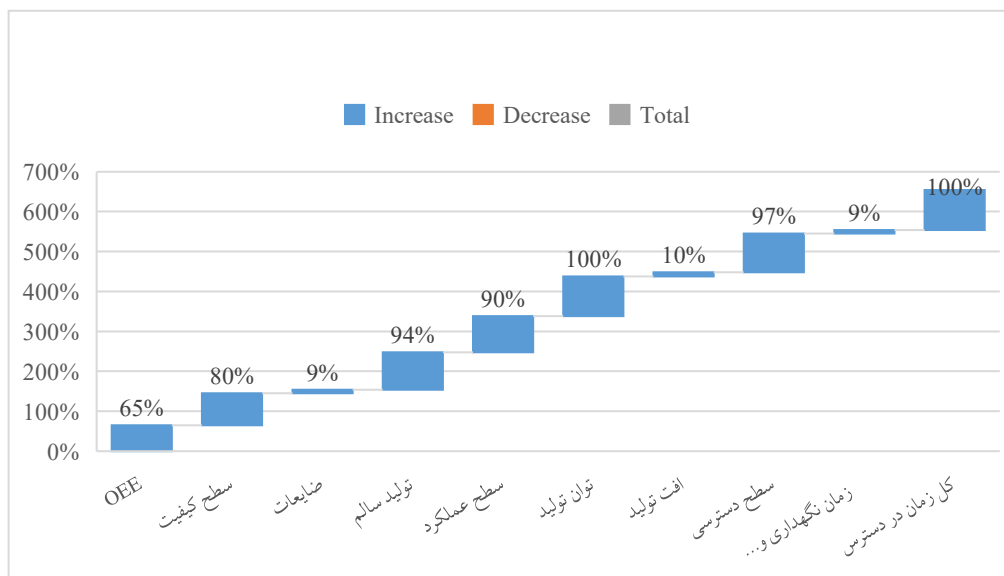
نتیجه محاسبات پس از آزمون پس از رفع مغایرت‌های *PFMEA* و *DFMEA* در شکل ۴ است:



شکل ۴- نمودار میانگین OEE به عنوان پس از آزمون در چهار هفته‌ی اجرای *PFMEA*.

Figure 4- Chart of average OEE as a post-test during the four weeks of *PFMEA* implementation.

همچنان‌که مشاهده می‌شود، میزان *OEE* نسبت به قبل از مداخلات حدود ۵٪ افزایش داشته است، به این معنی که *OEE* از ۶۰٪ به ۶۵٪ افزایش یافته است. همچنین، میزان ضایعات نسبت به قبل ۶٪ کاهش داشته است. نتیجه محاسبات *OEE* پس از آزمون و رفع مغایرت‌های *DFMEA* در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- نمودار میانگین OEE به عنوان پس از آزمون در چهار هفته‌ی اجرای *DFMEA*.

Figure 5- Chart of average OEE as a post-test during the four weeks of *DFMEA* implementation.

این میزان بهبود نشان‌دهنده بهتر شدن کارایی فرایند تولید و اثربخش بودن اقدامات انجام‌شده در جهت کاهش یا حذف خطاهای اولویت‌دار در فرایند تولید و در نتیجه ارتقای وضعیت تولید سالن پرس است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

برای ارزیابی میزان اثربخشی مداخلات انجام‌شده به منظور بهبود وضعیت تولید در صنایع مختلف، استفاده از پیش‌آزمون و پس‌آزمون می‌تواند بسیار مفید باشد. در این تحقیق، برای اطمینان از صحت و اثربخشی اقدامات و مداخلات انجام‌شده در پیاده‌سازی تکنیک‌های *DFMEA* و *PFMEA*,

از تکنیک OEE به عنوان پیش آزمون و پس آزمون استفاده شد. به دلیل اینکه پیاده سازی PFMEA به صورت فازی صورت گرفته است، OEE بهبود یافته و می توان ادعا کرد که اجرای پروژه پیاده سازی DFMEA و PFMEA به صورت تیمی و با مشارکت فعال صاحبان فرایندهای مرتبط، بهبود قابل توجهی در وضعیت تولید و دستیابی به نتایج بهتر و اثربخش تر داشته است.

علاوه بر این، در این تحقیق مشاهده شد که رابطه ی منفی ای بین اعداد اولویت خطا و مقادیر OEE تجهیزات وجود دارد. به عبارت دیگر، پیاده سازی مناسب اقدامات اصلاحی منجر به کاهش میانگین اعداد اولویت خطاها می شود و این کاهش بهبود میزان OEE را نشان می دهد.

منابع

- [1] Bharsakade, R., Badgujar, P., Malani, K., Rithe, S., & Salunke, P. (2023). Quality and efficiency improvement through process fmea-a case study. *Advances in modelling and optimization of manufacturing and industrial systems* (pp. 375–391). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6107-6_26%0A%0A
- [2] Quin, S., & Widera, G. E. O. (1996). Uncertainty analysis in quantitative risk assessment. *Journal of pressure vessel technology*, 118(1), 121–124. <https://doi.org/10.1115/1.2842154>
- [3] Shrehari, J., & Srinivasan, R. (2016). Failure modes and effective analysis of all-terrain vehicle and go-kart: A review. *International journal of science and research (ijsr)*, 5(12), 1543–1547. <https://www.ijsr.net/archive/v5i12/ART20163722.pdf>
- [4] Fabis-Domagala, J., Domagala, M., & Momeni, H. (2021). A matrix FMEA analysis of variable delivery vane pumps. *Energies*, 14(6), 1–14. <https://doi.org/10.3390/en14061741>
- [5] Liu, J., Wang, D., Lin, Q., & Deng, M. (2023). Risk assessment based on FMEA combining DEA and cloud model: A case application in robot-assisted rehabilitation. *Expert systems with applications*, 214, 119119. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119119>
- [6] Dittmann, L., Rademacher, T., & Zelewski, S. (2004). *Performing fmea using ontologies* [presentation]. 18th international workshop on qualitative reasoning. evanston usa (pp. 209–216).
- [7] Chang, K. H., & Cheng, C. H. (2010). A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in FMEA. *International journal of systems science*, 41(12), 1457–1471. <https://doi.org/10.1080/00207720903353633>
- [8] Sharma, R. K., & Sharma, P. (2010). System failure behavior and maintenance decision making using, RCA, FMEA and FM. *Journal of quality in maintenance engineering*, 16(1), 64–88. <https://doi.org/10.1108/13552511011030336>
- [9] Bujna, M., Lee, C. K., Kadnár, M., Korenko, M., & Baláži, J. (2023). New possibilities of using DEMATEL and ERPN in the new PFMEA hybrid model. *Applied sciences*, 13(6), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app13063627>
- [10] Saikouk, T., & Hamdi, A. (2024). Study and analysis of the PFMEA approach for the aerospace manufacturing industries: Evidence from aircraft manufacturers. *International journal of business excellence*, 32(3), 339–363. <https://doi.org/10.1504/IJBEX.2024.137258>
- [11] Ullah, M. R., Molla, S., Siddique, I. M., Siddique, A. A., & Abedin, M. M. (2023). Optimizing performance: A deep dive into overall equipment effectiveness (OEE) for operational excellence. *Journal of industrial mechanics*, 8(3), 26–40. <https://doi.org/10.46610/JoIM.2023.v08i03.004>
- [12] Ginsté, L., Van De, Aghezzaf, E. H., & Cottyn, J. (2022). The role of equipment flexibility in overall equipment effectiveness (OEE)-driven process improvement. *Procedia cirp*, 107, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.047>