



تحلیل همبستگی بین تکنیک FMEA و شاخص OEE: ارزیابی تأثیر تحلیل خرابی بر اثر بخشی تجهیزات (مطالعه موردی: شرکت شتاب کار)

سیده آزاده امیرکیایی^{۱*} غلامرضا هاشم زاده خوراسگانی^۲

۱- کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی تولید، دانشکده حسابداری و مدیریت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

ایمیل: ak_azadeh@yahoo.com

۲- استاد تمام رشته مدیریت صنعتی -تولید و عملیات دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

ایمیل: gh_hashemzadeh@azad.ac.ir

* نویسنده مسئول

چکیده

مقدمه: هیچ سازمانی در بازار جهانی نمی‌تواند زیان را بپذیرد؛ اثربخشی کلی تجهیزات (OEE) با سنجش عملکرد و شناسایی عوامل کاهش بهره‌وری، نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیندها دارد. به‌کارگیری تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) امکان کشف علل ریشه‌ای افت OEE را فراهم کرده و به بهبود بهره‌وری کمک می‌کند. **روش‌ها:** این پژوهش با هدف بررسی همبستگی بین تحلیل حالات خرابی (FMEA) و اثربخشی کلی تجهیزات (OEE) در شرکت شتاب کار، مستقر در تهران، انجام شده است. داده‌های تحقیق شامل اطلاعات خط تولید کارخانه در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳ بوده و از روش‌های مطالعه کتابخانه‌ای و جستجوی الکترونیکی برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است. برای تجزیه و تحلیل اطلاعات، آمار توصیفی و استنباطی به کار گرفته شده است. **یافته‌ها:** جهت بررسی نرمال بودن بودن متغیرها از آزمون اسمیرنوف کلموگروف استفاده شد، تفاوت معنی‌داری در سطح $\alpha=0/05$ بین توزیع نظری و توزیع تجربی وجود دارد. به دلیل نرمال نبودن داده‌ها، آزمون ناپارامتری اسپیرمن برای محاسبه ضریب همبستگی در این مطالعه استفاده شد. همبستگی معکوس میان شاخص RPN حاصل از اجرای FMEA و اثربخشی جامع تجهیزات (OEE) وجود دارد. مقدار همبستگی $-0/649$ بوده و با سطح معناداری $0/000$ در سطح خطای ۱ درصد تأیید شده است. **نتایج:** نتایج نشان‌دهنده همبستگی معکوس میان شاخص RPN حاصل از تحلیل حالات بالقوه شکست (FMEA) و اثربخشی جامع تجهیزات (OEE) است، که میزان آن در بخش‌های مختلف بهره‌وری، عملکرد و کیفیت بین $0/649$ تا $0/815$ متغیر است. همچنین، همبستگی مستقیم در برخی پارامترهای تشخیص خرابی‌ها مشاهده شده که بر بهبود OEE تأثیرگذار است.

کلمات کلیدی: OEE، RPN، FMEA، بهره‌وری تجهیزات، همبستگی.

Correlating Failure Mode Effect Analysis (FMEA) & Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Seyede-Azadeh Amir Kiaei^{1,*} Gholamreza hashemzadeh Khorasgani²

1- M.Sc INDUSTRIAL MANAGEMENT-PRODUCTION, FACULTY OF MANAGEMNET & ACCOUNTING DEPARTMENT OF MANAGEMENT ISLAMIC AZAD UNIVERSITY SOUTH TEHRAN BRANCH, Tehran, Iran. Email: ak_azadeh@yahoo.com.

2- Full Professor of Industrial Management, Production and Operations, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran. Email: gh_hashemzadeh@azad.ac.ir.

* Corresponding Author

Abstract

Introduction: No organization in the global market can accept losses; Overall Equipment Effectiveness (OEE) plays an important role in optimizing processes by measuring performance and identifying factors that reduce productivity. Using Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) allows discovering the root causes of OEE decline and helps improve productivity. **Methods:** This study was conducted to investigate the correlation between Failure Mode Analysis (FMEA) and Overall

Equipment Effectiveness (OEE) in Shetab Kar Company, located in Tehran. The research data included information on the factory production line in ۲۰۱۳ to ۲۰۱۴, and library study and electronic search methods were used to collect data. Descriptive and inferential statistics were used to analyze the data. Findings: The Smirnov-Kolmogorov test was used to examine the normality of the variables. There was a significant difference at the $\alpha = 0.05$ level between the theoretical and empirical distributions. Due to the non-normality of the data, Spearman's non-parametric test was used to calculate the correlation coefficient in this study. There is an inverse correlation between the RPN index obtained from the implementation of FMEA and the overall equipment effectiveness (OEE). The correlation value is -0.649 and has been confirmed with a significance level of 0.000 at the ۱ percent error level. Results: The results indicate an inverse correlation between the RPN index obtained from the analysis of potential failure modes (FMEA) and the overall equipment effectiveness (OEE), which varies between 0.649 and 0.815 in different sections of productivity, performance and quality. Also, a direct correlation has been observed in some failure detection parameters that affect the improvement of OEE.

Keywords: OEE, RPN, FMEA, Equipment Efficiency, correlation.

مقدمه

در رقابت جهانی، اثربخشی کلی تجهیزات (OEE^۱) نقش کلیدی در سنجش عملکرد و بهینه‌سازی بهره‌وری دارد. این شاخص منابع اتلاف را شناسایی کرده و مسیر بهبود را مشخص می‌کند. تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA^۲) می‌تواند دلایل افت OEE را کشف کرده و بهره‌وری را افزایش دهد. FMEA با رویکرد سیستماتیک به کاهش نقص‌ها در طراحی، تولید و خدمات قبل از تحویل محصول کمک می‌کند. صنعت خودرو به دلیل نقش حیاتی در تولید، اشتغال و درآمدزایی اهمیت ویژه‌ای دارد، اما با مازاد عرضه جهانی روبرو است که رقابت را تشدید کرده و کیفیت محصول را اولویت قرار داده است. در ایران نیز سرمایه‌گذاری گسترده‌ای انجام شده و استراتژی توسعه صنعتی بر رقابت‌پذیری، از جمله در حوزه قطعه‌سازی، تأکید دارد (رضانیان، محمد رحیم).

شرکت شتاب کار از سال ۱۳۷۵ در صنعت خودرو فعال بوده و با رشد چشمگیر، به یکی از پیشرفته‌ترین شرکت‌های مهندسی و تولیدی تبدیل شده است. این شرکت با اخذ تأییدیه پژو فرانسه، تولید و مونتاژ جعبه فرمان، قطعات موتور و قوای محرکه را انجام داده و سالانه بیش از ۱٫۵ میلیون قطعه تولید می‌کند. کیفیت بالای محصولات با بهره‌گیری از تکنولوژی پیشرفته، تست‌های آزمایشگاهی مدرن و استانداردهای سخت‌گیرانه تضمین شده و آزمایشگاه مرجع آن دارای گواهینامه تأیید ساپکو است. در صنایع تولیدی، اثربخشی تجهیزات و ماشین‌آلات نقشی اساسی در افزایش بهره‌وری و کیفیت دارد، زیرا جایگزینی آنها دشوار یا ناممکن است. اثربخشی کلی تجهیزات (OEE) شاخصی برای سنجش عملکرد است که تمام جنبه‌های بهره‌وری را پوشش می‌دهد. همچنین، تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) می‌تواند دلایل ریشه‌ای افت OEE را شناسایی کرده و به بهبود آن کمک کند (حسنی ۱۳۹۳، ۱۶).

شاخص OEE (اثربخشی کلی تجهیزات) عملکرد ماشین‌آلات را در سه حوزه زمان، میزان، و کیفیت تولید ارزیابی می‌کند و تصویری جامع از سلامت تجهیزات ارائه می‌دهد. این شاخص از ترکیب سه عامل در دسترس بودن، عملکرد، و کیفیت حاصل شده و به صورت درصد بیان می‌شود. در شرایط ایده‌آل، ماشین‌آلات باید بدون وقفه، با سرعت استاندارد، و بدون تولید محصولات معیوب کار کنند، اما در عمل، محدودیت‌های عملیاتی باعث کاهش OEE می‌شود. OEE به عنوان ابزاری برای بهبود مستمر، ابتدا با اقدامات اصلاحی بر تجهیزات مشکل‌دار تمرکز کرده و سپس این بهبودها را به دیگر بخش‌های کارخانه تعمیم می‌دهد. همچنین، این شاخص امکان مقایسه عملکرد ماشین‌آلات و خطوط تولید را فراهم کرده و در ارزیابی واحد نگهداری و تعمیرات (نت) نقش مهمی دارد (متولیان ۱۳۸۶، ۱۳، ۱۳۸۶، ۳۴، نیلی‌پور طباطبایی و همکاران ۱۳۸۹، ۷۲، حسنی ۱۳۹۳، ۲۱ و داسیلوا و همکاران ۲۰۰۸).

شدت رقابت، افزایش توقعات مشتریان و تحولات فناوری، تولیدکنندگان را ملزم به رفع عیوب و بهبود عملکرد محصولات می‌کند، زیرا کاهش رضایت مشتری منجر به از دست رفتن سهم بازار خواهد شد. برای دستیابی به این هدف، سازمان‌ها از روش تجزیه و تحلیل عوامل شکست و آثار آنها (FMEA) استفاده می‌کنند تا محصولات بدون عیب و رقابتی ارائه دهند. این ابزار، حالات بالقوه خرابی را شناسایی و اولویت‌بندی کرده، اقدامات لازم برای کاهش یا حذف آنها را تعیین می‌کند و نتایج تحلیل‌ها را به عنوان مرجع حل مشکلات آینده ثبت می‌نماید. FMEA یک تکنیک تحلیلی برای شناسایی و پیشگیری از خرابی‌های بالقوه است که ابتدا در ارتش آمریکا و سپس در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار گرفت. این روش بر اصل پیشگیری قبل از وقوع تأکید داشته و به افزایش ضریب ایمنی و رضایت مشتری کمک می‌کند. برخلاف روش‌های واکنشی، FMEA یک اقدام کنشی است که مشکلات بالقوه را پیش‌بینی، میزان ریسک آنها را ارزیابی و اقدامات اصلاحی را تعریف می‌کند. اجرای این تکنیک در مراحل اولیه طراحی و توسعه محصول یا فرآیند، هزینه و زمان اصلاحات را کاهش داده و نیاز به تغییرات بحرانی در آینده را کم می‌کند. اگر FMEA به‌موقع و صحیح اجرا شود، به یک ابزار پویا و همیشگی در چرخه بهبود مستمر تبدیل می‌شود. این روش به تنهایی مشکلات را حل نمی‌کند و باید همراه با سایر تکنیک‌های حل مسئله به کار گرفته شود.

در بررسی عملکرد تجهیزات و مدیریت تولید، روش‌های ارزیابی کارایی مانند OEE و تکنیک‌های تحلیل خرابی مانند FMEA نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی دارند. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در صنایع تولیدی، نیاز به رویکردهای تلفیقی برای افزایش بهره‌وری و کاهش مشکلات عملیاتی بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا، مطالعات متعددی به بررسی تأثیر OEE و FMEA بر بهبود عملکرد ماشین‌آلات پرداخته‌اند که در بخش پیشینه تحقیق به تفصیل بررسی خواهند شد. این مطالعات زمینه‌ساز درک بهتر ارتباط میان این دو روش و ارائه راهکارهای نوین در مدیریت تولید هستند.

¹ OEE (Overall Equipment Effectiveness)

² FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

مطالعه شفيعی نیک (۱۳۹۳) نشان داد که اجرای استانداردهای کیفی مانند ISO/TS 16949 در سازمان‌ها گسترش یافته و تأثیر قابل توجهی بر ارتقای شاخص‌های کیفی دارد. این تحقیق شامل یک فرضیه اصلی و شش فرضیه فرعی بوده و با استفاده از روش مدلسازی معادلات ساختاری (SEM)، همبستگی مثبت و معنادار بین اجرای استاندارد و بهبود شاخص‌های کیفی اثبات شد. یافته‌ها نشان دادند که ۹۱٪ از تغییرات شاخص‌های کیفی قابل پیش‌بینی از طریق اجرای ISO/TS 16949 است و در سطح اطمینان ۹۵٪ ارتقای این استاندارد موجب بهبود کیفیت خواهد شد. کلیه فرضیه‌های فرعی نیز تأیید شدند.

مطالعه دشتی و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد که تأخیرات در پروژه‌های ساخت اجتناب‌ناپذیر هستند و به دلیل پیچیدگی ارزیابی آن‌ها، نیاز به روشی مطمئن برای تحلیل علل و آثار تأخیرات وجود دارد. این پژوهش علل تأخیرات در پروژه‌های مهم استان مازندران را بررسی کرده و با توزیع پرسش‌نامه بین متخصصان ساخت‌وساز، عوامل تأثیرگذار را از دیدگاه کارفرما، پیمانکار، مشاور و عوامل خارجی شناسایی کرده است. سپس، با استفاده از روش FMEA، عوامل به‌وجودآورنده تأخیرات اولویت‌بندی شدند تا بتوان با اتخاذ تدابیر مناسب، از بروز تأخیرات مشابه در پروژه‌های آینده جلوگیری کرد.

مطالعه نایاک و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی OEE در فرآیند تولید عایق کابل پرداخته و تنگناها و مشکلات واحد تولید را شناسایی کرد. عامل اصلی فاصله OEE کارخانه با کلاس جهانی، سطح عملکرد تجهیزات تشخیص داده شد. همچنین، تحقیق به شناسایی علل شش ضایعه بزرگ تولید و ارائه راهکارهایی مانند استفاده از تکنیک‌های جدید، به‌کارگیری کارکنان ماهر، و استانداردسازی سرعت خط تولید برای کاهش اتلافات پرداخت.

مطالعه بلوچ و عبدالله (۲۰۱۲) به اندازه‌گیری OEE در کارخانه تولید روغن پالم مالزی پرداخته و دلایل کاهش دسترسی تجهیزات را شامل خرابی ماشین‌آلات، کمبود مواد ورودی، و کمبود اپراتور شناسایی کرد. نتایج نشان داد که کاهش عملکرد کارخانه به اندازه محصول ورودی، تعداد اسلات‌ها، و کیفیت مواد وابسته است. برای افزایش میزان دسترسی تجهیزات، کاهش خرابی‌های ناگهانی و برنامه‌ریزی نشده توصیه شد. همچنین، تعمیر و نگهداری روزانه، طراحی مجدد محصول، و بهبود کیفیت مواد اولیه به عنوان راهکارهایی برای افزایش عملکرد و کیفیت مطرح شدند.

سرمایه‌گذاری عمده در ماشین‌آلات تولیدیه دلیل نقش کلیدی آن‌ها در ایجاد ارزش افزوده و بهره‌وری صنعتی، اهمیت بالایی دارد. توقف تجهیزات مستقیماً موجب اختلال در تولید شده و جایگزینی آن‌ها بسیار دشوار است، برخلاف نیروی کار یا مواد اولیه که امکان جایگزینی سریع‌تری دارند. در حال حاضر، OEE و FMEA به‌طور جداگانه در صنایع بررسی می‌شوند، اما تلفیق این دو روش می‌تواند دیدگاه ارزشمندی برای بهبود عملکرد ارائه دهد. ترکیب این تکنیک‌ها نه تنها کاهش مشکلات عملیاتی را تسهیل می‌کند بلکه به افزایش کارایی تجهیزات نیز کمک می‌کند. به همین جهت هدف این پژوهش همبستگی تکنیک حالات خرابی و بررسی اثر آن FMEA و اثربخشی کلی تجهیزات OEE در صنعت (مطالعه موردی: شرکت شتاب کار) می باشد.

روش‌ها

این پژوهش یک مطالعه کاربردی و توسعه‌ای محسوب می‌شود که با رویکرد توصیفی و کمی انجام شده است. جامعه آماری شامل مدیران و کارشناسان فنی شرکت شتابکار (تهران) بوده و حجم نمونه ۵۸ نفر با روش نمونه‌گیری تصادفی ساده (SRS) تعیین شده است. هدف پژوهش، بررسی همبستگی بین تکنیک FMEA و شاخص OEE در حوزه تولید و عملیات است. داده‌ها از اجرای این دو روش در شرکت شتابکار جمع‌آوری شده و رابطه بین آن‌ها تحلیل گردیده است. قلمرو زمانی تحقیق شامل حداقل یک دوره ۶ ماهه (سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۳) و قلمرو مکانی، کارخانه شتابکار بوده که به عنوان نمونه مطالعه انتخاب شده است. در این تحقیق برای جمع‌آوری نتایج پژوهش‌های قبلی و نیز مطالعه مطالب نظری مربوط به موضوع تحقیق، از روش مطالعه کتابخانه‌ای و نیز جستجوی الکترونیکی استفاده شده است. جهت جمع‌آوری پشتوانه تئوریک مدل و اجزاء مربوط به آن ابتدا کتاب‌های مربوط مطالعه و سپس به بررسی پایان‌نامه‌های انجام شده در این زمینه پرداخته شد تا حتی‌المقدور این مطالب جمع‌آوری و جهت غنای ادبیات موضوع از آنها استفاده گردد. در همین حین با جستجوی مقالات و پژوهش‌های انجام شده در خارج از کشور نحوه همبستگی میان اثربخشی کلی تجهیزات (OEE) و تکنیک حالات خرابی و بررسی اثر آن (FMEA) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت آگاهی از صحت مطالب جمع‌آوری شده و شناخت واقعیت‌های موجود در صنعت، جلسات مصاحبه با چند تن از صنعتگران و مدیران عالیرتبه صنعت قطعه سازی خودرو برگزار شد.

به منظور تجزیه تحلیل اطلاعات تحقیق از برنامه ی آماری SPSS و از آمار توصیفی و هم استنباطی استفاده شد. در بخش آمار توصیفی، محاسبه شاخص مرکزی، شاخص‌های پراکندگی و شاخص‌های شکل و در بخش آمار استنباطی از تحلیل داده ها به صورت زیر استفاده می گردد. برای تعیین میزان پایایی سوالات پرسشنامه از روش آلفای کرونباخ استفاده میشود. برای بررسی نرمال بودن داده ها از آزمون کولموگوروف اسمیرنوف استفاده میشود.

یافته‌ها

این پژوهش شامل ۵۰ پاسخگو بوده که ۸۸ درصد مرد و ۱۲ درصد زن هستند. از نظر تحصیلات ۸ درصد دارای مدرک دکترا، ۲۴ درصد فوق لیسانس، ۴۴ درصد لیسانس، ۲ درصد فوق دیپلم، و ۲۲ درصد دیپلم می‌باشند. دامنه سنی شرکت‌کنندگان شامل ۴۸ درصد در بازه ۲۵ تا ۳۵ سال، ۳۰ درصد بین ۳۶ تا ۴۰ سال، ۱۶ درصد بین ۴۱ تا ۴۵ سال، و ۶ درصد بالای ۵۰ سال است. از نظر سابقه کاری ۲۸ درصد کمتر از ۵ سال، ۲۶ درصد بین ۵ تا ۱۰ سال، ۱۴ درصد بین ۱۱ تا ۱۵ سال، ۱۰ درصد بین ۱۶ تا ۲۰ سال، و ۲۲ درصد بیش از ۲۰ سال سابقه دارند.

آزمون اسمیرنوف-کولموگوروف نتایج بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها را ارائه می‌دهد. خروجی این آزمون شامل تعداد داده‌ها، میانگین، انحراف معیار، بیشترین انحراف مطلق، انحرافات مثبت و منفی، مقدار آماره Z، و سطح معناداری (sig) است. نتایج آزمون برای متغیرهای مورد بررسی در جدول ارائه شده است.

¹.OEE (Overall Equipment Effectiveness)

². FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

جدول ۱: آزمون اسمیرنوف کولموگوروف جهت بررسی نرمال بودن متغیرها

نام عوامل	قدرمطلق بیشترین انحراف	اسمیرنوف کلموگروف	سطح معنی داری
میزان وقوع رخدادها در بخش دسترسی	۰/۳۷۲	۲/۶۵۰	۰/۰۰۰
میزان وقوع رخدادها در بخش عملکرد	۰/۴۳۹	۳/۱۰۵	۰/۰۰۰
میزان وقوع رخدادها در بخش کیفیت	۰/۴۴۵	۳/۲۱۶	۰/۰۰۰
میزان شدت رخدادها در بخش دسترسی	۰/۴۵۸	۳/۲۳۸	۰/۰۰۰
میزان شدت رخدادها در بخش عملکرد	۰/۴۴۲	۳/۱۲۵	۰/۰۰۰
میزان شدت رخدادها در بخش کیفیت	۰/۴۵۵	۳/۲۱۸	۰/۰۰۰
میزان تشخیص رخدادها در بخش دسترسی	۰/۴۱۱	۲/۹۰۵	۰/۰۰۰
میزان تشخیص رخدادها در بخش عملکرد	۰/۴۳۱	۳/۰۴۹	۰/۰۰۰
میزان تشخیص رخدادها در بخش کیفیت	۰/۳۹۲	۲/۷۶۹	۰/۰۰۰
میزان دسترسی به تجهیزات در خط تولید	۰/۴۳۷	۳/۰۸۹	۰/۰۰۰
میزان عملکرد در خط تولید	۰/۴۹۰	۳/۴۶۳	۰/۰۰۰
میزان کیفیت در خط تولید	۰/۴۹۰	۳/۴۶۳	۰/۰۰۰
RPN حاصل از تجزیه و تحلیل بالقوه شکست	۰/۴۱۴	۲/۹۲۷	۰/۰۰۰
OEE محاسبه شده	۰/۴۲۶	۳/۰۱۴	۰/۰۰۰

با توجه به جدول فوق و با تأکید بر مقادیر اسمیرنوف کلموگوروف به دست آمده، عنوان می‌شود تفاوت معنی‌داری در سطح $\alpha=0.05$ بین توزیع نظری و توزیع تجربی وجود دارد. بنابراین، توزیع عوامل فوق‌نرمال نمی‌باشند و باید از روابط ناپارامتری در بررسی همبستگی میان عوامل استفاده نمود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که همبستگی معکوس و معناداری میان RPN (رتبه‌بندی ریسک خرابی) در FMEA و OEE (اثربخشی کلی تجهیزات) برقرار است. مقدار $\text{sig}=0.000$ ، کمتر از $\alpha=0.05$ تأیید می‌کند که این رابطه معنادار است. ضریب همبستگی معکوس برابر با -0.649 بوده و در سطح خطای ۱ درصد نیز معنادار می‌باشد. این یافته نشان‌دهنده تأثیر مستقیم کاهش RPN بر بهبود OEE است.

بحث و نتیجه گیری

این تحقیق به بررسی همبستگی بین اثربخشی جامع تجهیزات (OEE) و تجزیه و تحلیل حالات بالقوه شکست (FMEA) می‌پردازد. سوال اصلی پژوهش تعیین میزان ارتباط این دو روش در ارزیابی عملکرد تجهیزات است. علاوه بر این، نه سوال فرعی طراحی شده‌اند که به بررسی تغییرات عناصر داخلی FMEA—از جمله میزان وقوع، شدت، و تشخیص نقص‌ها در بخش‌های دسترسی، عملکرد، و کیفیت—و ارتباط آن‌ها با سه شاخص اصلی OEE یعنی دسترسی، عملکرد، و کیفیت می‌پردازند. هدف مطالعه، شناسایی تأثیر متقابل این متغیرها به منظور بهبود ارزیابی و مدیریت کارایی تجهیزات در محیط‌های صنعتی است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که میان تجزیه و تحلیل حالات بالقوه شکست (FMEA) و اثربخشی جامع تجهیزات (OEE) رابطه معکوس برقرار است. به این معنا که با اجرای FMEA، افزایش مقدار عدد اولویت ریسک (RPN) موجب کاهش اثربخشی تجهیزات، و کاهش RPN موجب افزایش اثربخشی تجهیزات می‌شود. این رابطه منطقی بوده و می‌تواند مبنایی برای ارزیابی میزان اثربخشی تجهیزات هنگام اجرای FMEA در خطوط تولید باشد. همچنین، تحلیل اولین سوال فرعی تحقیق نشان می‌دهد که میان احتمال وقوع نقص‌ها در اجرای FMEA و میزان دسترسی در OEE نیز رابطه معکوس وجود دارد. یعنی کاهش وقوع نقص‌های مرتبط با دسترسی، موجب افزایش میزان دسترسی در OEE می‌شود، در حالی که افزایش این نقص‌ها منجر به کاهش دسترسی خواهد شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که نوسان شدت و جدیت نقص‌ها در اجرای FMEA با میزان دسترسی در OEE رابطه معکوس دارد. کاهش شدت نقص‌های مرتبط با دسترسی، باعث افزایش میزان دسترسی، و افزایش آن موجب کاهش دسترسی تجهیزات می‌شود. همچنین، نوسان میزان تشخیص نقص‌ها در اجرای FMEA با دسترسی در OEE رابطه مستقیم دارد. به این معنا که هرچه دقت تشخیص نقص‌ها در FMEA افزایش یابد، میزان دسترسی در OEE نیز بهبود می‌یابد، و بالعکس. در بررسی نوسان وقوع نقص‌ها مشخص شد که این عامل با عملکرد تجهیزات در OEE رابطه معکوس دارد. کاهش وقوع نقص‌های مرتبط با عملکرد باعث افزایش کیفیت اجرای تجهیزات، در حالی که افزایش وقوع این نقص‌ها منجر به افت عملکرد می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که نوسان جدیت و شدت نقص‌ها در اجرای FMEA با عملکرد تجهیزات در OEE رابطه معکوس دارد. کاهش شدت نقص‌های مرتبط با عملکرد، باعث افزایش بهره‌وری تجهیزات، در حالی که افزایش این نقص‌ها منجر به افت عملکرد می‌شود. همچنین، نوسان میزان تشخیص نقص‌ها در اجرای FMEA با عملکرد در OEE رابطه مستقیم دارد. افزایش دقت تشخیص نقص‌ها موجب بهبود عملکرد تجهیزات، در حالی که کاهش این قابلیت منجر به افت عملکرد خواهد شد. در بررسی نوسان وقوع نقص‌ها مشخص شد که این عامل با کیفیت تجهیزات در OEE رابطه معکوس دارد. کاهش وقوع نقص‌های مرتبط با کیفیت، موجب افزایش سطح کیفیت تجهیزات، در حالی که افزایش وقوع این نقص‌ها منجر به کاهش کیفیت خواهد شد. همچنین نوسان شدت و جدیت نقص‌ها با کیفیت رابطه معکوس دارد. کاهش شدت نقص‌ها باعث افزایش سطح کیفیت، و افزایش شدت آن‌ها منجر به افت کیفیت می‌شود. در نهایت، نوسان

میزان تشخیص نقص‌ها در بخش کیفیت رابطه مستقیم با سطح کیفی تجهیزات دارد. افزایش دقت تشخیص نقص‌ها منجر به بهبود کیفیت، و کاهش این تشخیص منجر به افت کیفیت تجهیزات خواهد شد.

این پژوهش به وضوح تأثیر مثبت تجزیه و تحلیل حالات بالقوه شکست (FMEA) را بر اثربخشی جامع تجهیزات (OEE) تأیید می‌کند. علاوه بر مزایای شناخته‌شده این تکنیک در منابع علمی، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که اجرای FMEA می‌تواند به بهبود بهره‌وری و کاهش نقص‌های تولیدی کمک کند. مزایای کلیدی اجرای FMEA عبارت‌اند از:

- بهبود کیفیت و افزایش اطمینان و ایمنی محصول
 - کاهش زمان ورود محصول به بازار با شناسایی مشکلات طراحی و تولید در مراحل اولیه
 - کاهش نیاز به تغییرات فرآیندی هنگام تولید انبوه
 - ارتقای تصویر سازمان نزد مشتریان* از طریق کاهش عیوب و افزایش رقابت‌پذیری
 - کاهش هزینه‌های مرتبط با محصولات نامنطبق
 - تقویت فرهنگ کار تیمی در سازمان
- اجرای این پژوهش در شرکت شتابکار نشان داد که FMEA نه تنها در سطح نظری بلکه در محیط عملی نیز موجب بهبود اثربخشی تجهیزات شده و کارایی فرآیند تولید را افزایش داده است. این تحقیق پیشنهاداتی برای بهینه‌سازی فرآیند FMEA در شرکت‌ها ارائه می‌دهد:
- محاسبه اثربخشی تجهیزات در تمامی خطوط تولیدی باید در برنامه کاری قرار گیرد تا کارشناسان و سرپرستان بتوانند به میزان کارایی تجهیزات حساس‌تر شده و در صورت کاهش اثربخشی، FMEA را اجرا کنند.
 - استفاده از FMEA برای جلوگیری از خطاها در محیط‌های تولیدی که عملکرد تجهیزات کاهش یافته است، به عنوان راهکاری جهت بهبود وضعیت.
 - بهره‌گیری از FMEA در طراحی و توسعه محصولات و خدمات به منظور ارتقای اثربخشی فرآیندها.
- توجه به ماهیت تیمی FMEA و اجرای آن به عنوان زیرساختی برای افزایش اثربخشی تجهیزات، با وجود امکان محاسبه OEE توسط یک فرد.

مراجع

۱. حسنی، ل. (۱۳۹۳). مطالعه اثرات بکارگیری اثربخشی کلی تجهیزات بر روی اتلاف تولید (مطالعه موردی شرکت تولیدی کابل مغان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مدیریت صنعتی گرایش تولید و عملیات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.
۲. متولیان، ص. (۱۳۸۶). اثربخشی کلی تجهیزات (OEE). تهران: مؤسسه خدمات فرهنگی رسا.
۳. نیلی‌پور طباطبایی، ا. و رستم‌زاده، ع. و رستم‌زاده، م.م. (۱۳۸۹). بررسی تأثیر شش ضایعه عمده صنعت بر اثربخشی کلی تجهیزات در کارخانه نورد سرد مجتمع فولاد مبارکه. مجله علمی-پژوهشی مدیریت تولید و عملیات، سال اول، شماره اول، صص: ۷۱-۸۶.
۴. شفیع‌نیک، ر. (۱۳۹۳). بررسی تأثیر پیاده سازی استاندارد ISO/TS 16949 بر شاخص‌های کیفیت در صنایع قطعه سازی خودرو مطالعه موردی شرکت سایپا پرس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی - دانشکده مدیریت.
۵. دشتی نصرآبادی، ج. و طاهری امیری، م. و تیلان، ن. و جوهری بارفروشی، م. (۱۳۹۲). شناسایی و اولویت بندی عوامل به وجود آورنده تاخیرات با استفاده از روش FMEA. اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار. انجمن ارزیابان محیط زیست هگمتانه.
6. Dasilva Manuel Inacio, C. Manuel Pereira Cabrita, C. de Oliveira Matias Joao Carlos.P. (2008). Reliability Maintenance: a Case Study Concerning Maintenance Service Study Concerning Maintenance Service Costs. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 343-355.
7. Nayak, D.M. & Kumar M.N. & Naidu, G.S & Shankar, V. (2013).
8. Baluch, N. & Abdullah, C.S. (2012). Measuring OEE in Malaysian Palm Oil Mills. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, 4, pp. 733-743.