سومین کنفرانس بین المللی چالش‌ها و راهکارهای نوین در مهندسی صنایع، مدیریت و حسابداری
3rd International Conference on Challenges and New Solutions in Industrial Engineering, Management and Accounting
www.confima.ir
دانشگاه بین المللی چابهار
کد اختصاصی: ۰۱۲۱۱-۷۴۳۱۰

FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر، بررسی یک نمونه در صنعت فولاد

سوده کامجو[a]، مریم‌السادات اخوان حجازی[b]، امیرعلی نادری[c]
[a] دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان.
[b] دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان.
[c] دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان.
نویسنده مسئول: مریم‌السادات اخوان حجازی (۰۹۱۲۴۹۸۸۶۰۶ ، mhejazi@kashanu.ac.ir)

چکیده: FMEA یک روش استاندارد جهت یافتن راه‌هایی برای پیشگیری از بروز مشکلات، حذف منبع ایراد و افزایش قابلیت اطمینان است. در واقع تجزیه و تحلیل حالت‌ها و اثرات خرابی (FMEA) ابزاری است که می‌تواند خطرات را در مرحله طراحی و قبل از وقوع کاهش دهد. اما این تکنیک، محدودیت‌هایی دارد که در این مجال به آن‌ها پرداخته شده است. مقاله مرجعی که مطالعه حاضر بر مبنای آن صورت گرفته[1]، روش جدیدی را با عنوان FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر، معرفی می‌کند؛ که می‌تواند هزینه کلی یک سیستم را در دوره عمرش کاهش دهد. مقاله حاضر، همین روند را بصورت مطالعه موردی بر روی قطعه‌ای به نام سگمنت که در صنعت فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، اجرا کرده است. با اجرای این روش و انجام چند اقدام اصلاحی، در طول یکسال، تنها برای یک قطعه در صنعت مذکور، هزینه‌های تعمیرات به میزان ۲۷۹/۲ میلیون تومان کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تجزیه و تحلیل حالت‌ها و اثرات خرابی(FMEA)؛ FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر؛ ارزیابی ریسک؛ افزایش قابلیت اطمینان؛ دسترس پذیری.

۱. مقدمه

تجزیه و تحلیل حالت‌ها و اثرات خرابی (FMEA) ابزاری است که بطور گسترده در صنایع خودرو، هوا فضا و الکترونیک، برای شناسایی، اولویت‌بندی، حذف خرابی‌ها، مشکلات و خطاهای احتمالی سیستم‌ها در مرحله طراحی و قبل از عرضه محصول، مورد استفاده قرار می‌گیرد[2]. چندین استاندارد صنعتی مانند استاندارد FMEA انجمن مهندسان خودروساز، استاندارد FMEA وزارت دفاع ایالات متحده و استاندارد FMEA گروه راهبردی صنعت خودرو، از (RPN) برای اندازه‌گیری خطر و شدت خرابی‌ها استفاده می‌کنند[3,4]. ریسک، بر اساس شماره اولویت (RPN)، اندازه‌گیری می‌شود. سپس بر اساس اولویت اندازه‌گیری شده، جهت رفع ایراد اقدام می‌شود. عدد(RPN) نتیجه سه مشخصه است: شدت (S)، رخداد (O) و تشخیص(کشف)(D)[5]. شدت(S) به معنی شدت تأثیری است که خرابی بر عملکرد محصول می‌گذارد و رخداد(O)، به معنی احتمال وقوع خرابی و تشخیص(D) به این معنی است که چقدر می‌توان روند پیشرفت را کنترل کرد یا چقدر می‌توان خرابی محصولی که در دست مشتری است را تشخیص داد. تعریف اول شانس ابتلا به مشکل، قبل از اینکه محصول به مشتری تحویل داده شود را بررسی می‌کند و تعریف دوم، احتمال کشف ایراد توسط مشتری، قبل از بروز حادثه فاجعه آمیز. فرم‌های FMEA رایج دارای چند ستون هستند که کل زنجیره خرابی‌ها و علت واقعی شکست‌ها را توصیف می‌کند[2]. سپس مهندسان، طراحی را با توجه به "علت اصلی" و "نتایج نهایی" خرابی‌های احتمالی در زیر مجموعه یا اجزاء آن ارزیابی کرده و با ایجاد تغییر در طراحی قطعه، عدد ریسک را پایین آورده و شرایط را به وضعیت ایده‌آل نزدیک می‌کنند[5].

۲. FMEA رایج

FMEA رایج با در نظر گرفتن سه متغیر رخداد (O)، شدت (S) و تشخیص(کشف)(D)، از RPN، برای ارزیابی ریسک استفاده می‌کند(جدول۱).

جدول (۱): نمونه فرم FMEA رایج

نام قطعه	عملکرد	حالات بالقوه خرابی	اثر بالقوه خرابی	شدت	علل بالقوه خرابی	احتمال وقوع	کنترل های خرابی	احتمال کشف	RPN

برای هر یک، رتبه‌بندی از ۱ تا ۱۰ انجام می‌شود. شاخص شدت (S)، جدّیت اثرات حالت خرابی را نشان می‌دهد. بنابراین، شاخص شدت به نتیجه نهایی یک شکست اختصاص دارد. "۱" در شاخص شدت، مربوط به ایرادی است که بر هیچ چیز تأثیر نمی‌گذارد، "۵" مربوط به افت عملکرد و "۱۰" مربوط به نوعی از خرابی دستگاه یا قطعه است که می‌تواند فاجعه به بار آورد(جدول۲).

رخداد (O) احتمال اتفاق افتادن خرابی است و بیشتر بودن این عدد به معنی بیشتر بودن احتمال اتفاق افتادن خرابی می‌باشد (جدول۳).

شاخص تشخیص (کشف) (D) بر اساس احتمال تشخیص مشکل، در بررسی‌های مربوط به طراحی، آزمایش و اندازه‌گیری‌های کنترل کیفیت به دست می‌آید. در شاخص تشخیص، "۱" مربوط به حالتی از خرابی است که تقریباً شناسایی شدنش قطعی است و "۱۰" مربوط به خرابی است که تقریباً شناسایی‌اش غیرممکن است(جدول۴). همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده، این شاخص‌ها (رخداد، شدت و تشخیص)، عدد (RPN) را بوجود می‌آورند که نشان دهنده ریسک مربوط به هر خرابی است[6].

جدول (۲): شدت اثر (S)

رتبه	معیار	شدت اثر
۱	بدون اثر	هیچ
۲	اثر بسیار خفیفی بر عملکرد محصول دارد.	خیلی ناچیز
۳	اثر کمی بر عملکرد محصول وجود دارد.	ناچیز
۴	اثر نسبتا کمی بر عملکرد محصول دارد و با استفاده بیشتر منجر به افت در عملکرد نهایی محصول می‌گردد.	خیلی کم
۵	اثر متوسطی بر عملکرد محصول دارد و با استفاده بیشتر منجر به افت شدید در عملکرد نهایی محصول می‌گردد.	کم
۶	عملکرد نهایی محصول افت می‌کند اما به درستی عمل کرده و ایمن است.	متوسط
۷	عملکرد نهایی محصول به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و لازم است تمهیداتی برای آن سنجیده شود. قطعه معیوب است.	زیاد
۸	محصول عمل نمی‌کند اما ایمن است، قطعه عمل نمی‌کند.	خیلی زیاد
۹	اثر شدید است و ممکن است محصول منجر آسیب انسانی شود و امکان تداخل با مقررات دولتی وجود دارد.	جدی
۱۰	اثر خیلی شدید وجود دارد و ممکن است به فاجعه منجر گردد و مغایرت با مقررات دولتی وجود دارد.	پر خطر

جدول (۳): رخداد (O)

رتبه	معیار	احتمال وقوع
۱	احتمال وقوع خرابی وجود ندارد و سوابق نیز چیزی نشان نمی‌دهد.	$\leq \frac{0.01}{1000}$
۲	احتمال خرابی بسیار نادر است.	$\leq \frac{0.1}{1000}$
۳	احتمال خرابی بسیار کم است.	$\leq \frac{0.5}{1000}$
۴	احتمال کم است.	$\leq \frac{1}{1000}$
۵	گاهی اوقات خرابی دیده شده است.	$\leq \frac{2}{1000}$
۶	تعداد خرابی متوسط است.	$\leq \frac{5}{1000}$
۷	تعداد خرابی نسبتا زیاد است.	$\leq \frac{10}{1000}$
۸	تعداد خرابی زیاد است.	$\leq \frac{20}{1000}$
۹	تعداد خرابی خیلی زیاد است.	$\leq \frac{50}{1000}$
۱۰	تعداد خرابی حالت بحرانی دارد و سوابق نیز این موضوع را نشان می‌دهد.	$\leq \frac{100}{1000}$

جدول (۴): احتمال کشف (تشخیص) (D)

رتبه	معیار	احتمال کشف
۱	کنترل، بطور حتم خرابی و یا حالت خرابی را شناسایی می‌کند.	تقریبا قطعی
۲	کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس خیلی زیادی دارد.	خیلی زیاد
۳	کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس زیادی دارد.	زیاد
۴	کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس نسبتا زیادی دارد.	نسبتا زیاد
۵	کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس متوسط دارد.	متوسط
۶	عملکرد کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس نسبتا کمی دارد.	متوسط به پایین
۷	کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس کمی دارد.	کم
۸	کنترل، در شناسایی علت خرابی و یا حالت خرابی شانس خیلی کمی دارد.	خیلی کم
۹	بعید به نظر می رسد کنترل بتواند علت خرابی یا حالت خرابی را شناسایی کند.	بعید
۱۰	تکنیک خاصی برای کشف علت خرابی یا حالت خرابی وجود ندارد.	تقریبا غیر ممکن

۲. ۱. کمبودهای FMEA رایج

در روش FMEA سنتی، جدولی مشتمل بر یک سری مقادیر تنظیم می‌شود و تصمیم‌گیری‌های بعدی براساس آن مقادیر انجام می‌گیرد. ولی در این روش نقایصی هم وجود دارد. مثلاً: فاصله بین رخدادها اندازه‌گیری نمی‌شود یا به دلیل وصفی بودن، امتیازدهی به مقادیر شدت اثر، رخداد و تشخیص، سلیقه‌ای بوده و بسته به

متفاوت بودن نظر افراد، ممکن است تغییر کند. از طرف دیگر این روش مقدار عددی قابل لمسی که بتواند حساسیت یک خرابی را نسبت به بقیه تعیین کند، ارائه نمی‌دهد. مشکلاتی از این دست محققان را برآن داشت تا به دنبال راه حل مناسب‌تری باشند [1].

۲. ۲. تحقیقات مرتبط

تحقیقات متنوعی بر روی FMEA رایج و با اندازه‌گیری‌های حالات مختلف و در نظرگرفتن سناریوهای متفاوت انجام شده است. به عنوان مثال یک مطالعه با مدیریت فواصل احتمال خرابی، تجزیه و تحلیل حساسیت موضوع، استفاده از داده‌های قابلیت اطمینان اجزاء، الزامات تجزیه و تحلیل استاندارد FMEA را مبنا قرار داده و در میان علت و معلول‌ها و ترکیب متعدد آن‌ها، اولویت‌ها را تعیین و ردیابی می‌کند[2]. در مقاله‌ای به ضعف‌های FMEA سنتی پرداخته و پیشنهاد شده است که FMEA به جای حالت‌های خرابی، بر سناریوهای خرابی تمرکز کند و از طرف دیگر خرابی‌های پیش آمده با استفاده از احتمالات و هزینه‌هایی که تحمیل می‌کنند، ارزیابی شده و براساس نتیجه ارزیابی‌ها، تصمیم‌گیری شود[7].

مقاله‌ای ابزار FMERA (Failure Modes, Effects, and Risk Analysis) را معرفی کرده و این مراحل را پیشنهاد می‌کند: تعیین حالت‌ها و رویدادهای شکست بالقوه، ارزیابی ریسک مالی رویداد، فراوانی شکست احتمالی، محاسبه و رتبه بندی ریسک‌های مالی، انتخاب موارد با ریسک مالی بالا، بررسی جایگزین‌ها و هزینه‌های مربوط، اولویت‌بندی اقدامات بر اساس اهداف مالی[8]. روش تحلیلی دیگری با تجزیه و تحلیل ساختاری و آنالیز کیفی حالت‌ها و اثرات شکست (FMEA)، قادر به تجزیه و تحلیل آن‌ها و تأثیراتشان بر قابلیت اطمینان و کیفیت محصول است[9].

مطالعه‌ای، FMEA و استفاده از RPN برای اولویت‌بندی حالت‌های خرابی را بررسی کرده و معتقد است اگرچه این روش به خودی خود کاربرد زیادی دارد، اما محاسبه RPN می‌تواند گمراه کننده باشد و روش جایگزینی را با استفاده از هزینه‌های مورد انتظار به عنوان مبنای اولویت‌بندی حالت‌های خرابی، پیشنهاد می‌کند[10].

پیشنهاد دیگری متکی بر تخمین احتمال خطا و احتمال اینکه مشتری قطعه معیوب را دریافت کند، مطرح شد. نویسنده معتقد است که این احتمالات را می‌توان با استفاده از سوابق تولید و سوابق مشتری و نتایج بازرسی نمونه محصولات تخمین زد. با اینکه این اطلاعات در مرحله طراحی محصول مورد نظر در دسترس نیست، اما این تکنیک به بهبود کیفیت در مرحله تولید کمک می‌کند. گرچه این روند، انتظارات واقعی از FMEA را برآورده نمی‌کند[11].

مطالعه دیگری به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو با پیشنهاد یک مجموع وزنی شامل شش پارامتر (ایمنی، اهمیت دستگاه در فرآیند، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، تعداد دفعات خرابی، طول زمان خرابی و شرایط عملیاتی) و ضرب در ضریب هفتم (دسترسی ماشین)، روشی جهت اتخاذ خط مشی تعمیر و نگهداری معرفی کرده است[12].

محدودیت‌هایی که در FMEA فعلی وجود دارد (از قبیل مقیاس نداشتن شدت اندازه‌گیری شده)، مورد نقد قرار گرفته و بر اتلاف زمان و هزینه متمرکز شده و گزینه‌هایی را مطرح می‌کند که می‌توانند هزینه کلی چرخه عمر یک سیستم خاص را کاهش دهند. سپس یک شبیه‌سازی مونت کارلو به FMEA مبتنی بر هزینه اعمال می‌شود تا عدم قطعیت‌ها را در زمان تشخیص، زمان تثبیت، وقوع، زمان تأخیر، زمان خرابی و سناریوهای پیچیده مدل‌سازی کند[13]. در مطالعه‌ای که برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم انجام شده، ابتدا برای مدل، یک فرمول غیر خطی نوشته می‌شود بطوریکه در آن، هزینه به عنوان تابع هدف برای قابلیت اطمینان یک جزء در نظر گرفته شده و برای اطمینان بخشی بهینه، باید حداقل این تابع هدف (هزینه سیستم) محاسبه شود[14].

مطالعه‌ای با بررسی ابزار FMEA، آن را به عنوان یک ابزار تجزیه تحلیل "از پایین به بالا" معرفی می‌کند به این معنی که کار تجزیه و تحلیل را با شناسایی اجزا و فهرست کردن آن‌ها شروع کرده و با پیش‌بینی همه حالت‌های خرابی، اثرات بالقوه خرابی‌ها و احتمال وقوع آن‌ها را ارزیابی می‌کند[15]. رویکرد دیگری به دنبال به حداکثر رساندن دوره عمر یک محصول در مراحل اولیه طراحی است در حالی که هزینه و اثرات زیست محیطی را به حداقل می‌رساند[16].

رویکردهای جدید (FMEA) به برخی از مشکلات که در بخش قبل ذکر شد، پرداخته اما هنوز موارد زیر بطور مناسب بررسی نشده است: ۱- هزینه‌های قطعی خرابی. ۲- حساسیت‌های آنالیز. ۳- تشخیص مناسب و به دور از ملاحظات سلیقه‌ای.

در مطالعه‌ای هزینه‌های ناشی از خرابی‌ها به عنوان عاملی تأثیرگذار در برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه جهت افزایش قابلیت اطمینان مورد توجه واقع شد[1]. از آنجاییکه بی شک در تمامی صنایع، این هزینه‌ها در تصمیم‌گیری های کلان آن مجموعه نقش مهمی ایفا می‌کنند، نویسندگان برآن شدند تا تحقیقات خود را در یکی از صنایع مهم کشور بر این اساس بنا کنند؛ و به دلیل اینکه دسترسی به اطلاعات مورد نیاز در صنعت فولاد میسر بود، صنعت مذکور و یکی از خرابی‌هایی که درحال حاضر هزینه مالی و زمانی زیادی به این صنعت تحمیل می‌کند، انتخاب و مطابق با روش مقاله[1]، عمل شد.

۳.۲. FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر

در این روش، مسیر جدیدی ایجاد شد تا برکمبودهای FMEA سنتی غلبه کند. FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر، ریسک را از نظر هزینه اندازه‌گیری می‌کند. هزینه، یک زبان جهانی است که می‌تواند به راحتی در مورد شدت خرابی در بین مهندسان و دیگران درک شود[13]. بنابراین، هزینه خرابی می‌تواند با استفاده از رابطه (۱) با ساده‌ترین شکل تخمین زده شود:

هزینه قابل پیش‌بینی برای خرابی = $\sum_{i=1}^{n}(P_i C_i)$ (۱)

۴.۲. تفسیر جدول FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر

جدول (۵)، FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر را نشان می‌دهد که در آن، منشاء، نشان‌دهنده زمانی است که این خرابی بوجود آمده است. به عنوان مثال منشاء خرابی ممکن است مرحله: طراحی، ساخت، نصب و بهره برداری باشد. مرحله تشخیص، مرحله‌ای را نشان می‌دهد که خرابی تشخیص داده شده است. مرحله تشخیص خرابی، می‌تواند زمان بررسی طراحی، بازرسی، آزمایش و یا بهره‌برداری باشد. در نتیجه خرابی ممکن است در هر مرحله از چرخه عمر سیستم رخ دهد و ممکن است یا در همان مرحله یا در طی مراحل بعد تشخیص داده شود. اگر خرابی و تشخیص در یک زمان اتفاق بیفتند، هزینه خرابی حداقل مقدار است. هرچه فاصله وقوع خرابی و زمان تشخیص خرابی بیشتر شود، هزینه رفع ایراد افزایش می یابد.

هزینه، سه مؤلفه اصلی دارد: هزینه نیروی انسانی، هزینه مواد و قطعات و هزینه زمان. هزینه زمان را نیز می‌توان به چهار مرحله مختلف تقسیم کرد: زمان تشخیص، زمان تعمیر، زمان تأخیر و زمان بازیابی.

زمان تشخیص: زمان درک و شناسایی نوع خاصی از خرابی است که رخ داده و محل دقیق خرابی تشخیص داده می‌شود.

زمان تعمیر: زمان رفع عیب است. زمان رفع واقعی عیب، برای هر جز جداگانه محاسبه می‌شود.

زمان تأخیر: زمان صرف شده برای فعالیت های غیر ارزشمند است. مانند زمان انتظار برای انجام امور جهت رفع عیب، ارسال نامه‌های اداری یا زمان حمل و نقل و ... .

زمان بازیابی (زمان از دست رفته): زمانی است که سیستم به دلیل خرابی کار نمی‌کند و نیاز است تا به حالت اولیه خود برگردد. این زمان، زمان از دست رفته است.

نکته: در صورتی که ایراد و تشخیص آن در یک زمان اتفاق بیفتند هزینه خرابی به حداقل می‌رسد و گران‌ترین خرابی زمانیست که ایراد در مرحله طراحی ایجاد شود و تا زمان بهره برداری (شناسایی توسط مشتری) تشخیص داده نشود.

نمونه‌هایی از منشاء خرابی‌ها در مرحله طراحی عبارتند از محاسبات نادرست طراحی، انتخاب نادرست مواد یا قطعات که ممکن است طی بررسی‌های طراحی قبل از تولید قطعات و یا مراحل بعدی تشخیص داده شوند. نمونه‌هایی از ایرادات در مرحله ساخت عبارتند از اشتباه انسانی (اپراتور)، کالیبراسیون نادرست و به کار گرفتن مواد یا قطعات نامناسب. این اشتباهات نیز در حین بازرسی قطعات یا در مراحل بعدی قابل تشخیص هستند.

مثلاً یکی از مشکلات در مرحله نصب، ممکن است روش نادرست نصب باشد. از قبیل اعمال نیروی بسیار زیاد یا بسیار کم به قطعه یا ابزار به هنگام سفت کردن اتصالات که باعث آسیب دیدن قطعه می‌گردد.

جدول (۵): نمونه فرم FMEA مبتنی بر هزینه عمر

حالت خرابی	علت اصلی خرابی	اثر خرابی	ورودی								خروجی		
			منشا	مرحله تشخیص	وقوع مجدد	تکرار	زمان تشخیص	زمان تعمیر	زمان تأخیر	زمان از دست رفته	تعداد	هزینه قطعات	هزینه نیروی انسانی	هزینه متریال	هزینه زمان

۵.۲. روش محاسبه هزینه‌ها

هزینه نیروی انسانی را می‌توان با اطلاعات زمانی موجود در جدول FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر و از رابطه (۲) بدست آورد:

(۲) وقوع * {(زمان تشخیص*نرخ کار*تعداد اپراتورها)+(زمان تعمیر* نرخ کار*تعداد اپراتورها)+(زمان تاخیر* نرخ کار*تعداد اپراتورها)}=هزینه نیروی انسانی

هزینه مواد و قطعات، هزینه‌هایی است که به هنگام تعویض قطعات به دلیل خراب شدن، تحمیل می‌شود. این هزینه با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید:

(۳) وقوع * قیمت قطعه یا مواد مورد نظر= هزینه مواد

هزینه زمان هزینه‌ای است که سیستم در صورت خرابی متحمل می‌شود و عملکرد اصلی سیستم را مختل و از عملکرد صحیح آن جلوگیری می‌کند و به کمک رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

(۴) زمان خاموشی * هزینه زمان در هر ساعت= هزینه زمان و {زمان تشخیص+زمان تعمیر+زمان تأخیر}= زمان خاموشی

در روش FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر، از اطلاعات ثبت شده مربوط به خرابی‌ها در یک دوره زمانی مشخص، استفاده می‌شود و خرابی‌ها، براساس هزینه‌هایی که به سیستم تحمیل می‌کنند، اولویت‌بندی می‌شوند. در این محاسبات تعداد دفعاتی هم که یک خرابی اتفاق می‌افتد در محاسبات لحاظ می‌شود. اگر محاسبات و تصمیم‌گیری‌ها، تنها مبتنی بر میانگین تعداد خرابی‌ها و بدون توجه به هزینه‌ها انجام شود، ممکن است نتواند گویای اهمیت یک خرابی از نظر اقتصادی باشد. دسترس‌پذیری(A) یک جز قابل تعمیر، همانطور که در رابطه (۵) بیان شده یک مقدار تقریبی است[17].

$$\frac{MTTF}{MTBF} = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} = (A) \qquad (۵)$$

دسترس پذیری (A): مقدار متوسط احتمال آن است که یک آیتم نقش مورد نیاز خود را در شرایط داده شده زمانی ایفا کند.

که در آن:

MTBF (Mean Time Between Failures): میانگین زمان بین خرابی هاست و می‌تواند به عنوان میانگین تعداد ساعات بین دو بار، از کار افتادن اجزاء یا کل سیستم باشد و بطور معمول مقدار متغیری است که در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان بکار می‌رود.

MTTR (Mean Time to Repair): میانگین زمان تا انجام تعمیر و انجام اقدامات اصلاحی بر روی قطعات خراب شده در یک محصول یا سیستم است و تجزیه و تحلیل می‌کند که در صورت خرابی سیستم تعمیر و نگهداری چه مدت زمانی طول می‌کشد تا سیستم مجدداً به سیکل کاری برگردد.

MTTF (Mean Time To Failure): این مقدار میانگین زمان مورد انتظار برای اولین خرابی یک قطعه می‌باشد.

و رابطه (۶) که معکوس MTBF است معرف نرخ خرابی است.

$$\mu = \frac{1}{MTBF} \qquad (۶)$$

روش ذکر شده در بالا را می‌توان برای پیش بینی دسترس‌پذیری سیستم‌ها یا زیر مجموعه‌های آن به کار برد. دسترس‌پذیری یک جزء از یک سیستم که بسیاری اجزا از نوع مشابه، دارد را می‌توان با استفاده از، رابطه (۷) بیان کرد:

$$A_{sys} = (A_{1C})^n \qquad (۷)$$

که در آن، A_{sys} دسترس‌پذیری مجموعه، A_{1C} دسترس‌پذیری یکی از اجزاء و n تعداد اجزاء است. می‌توان فراوانی خرابی‌ها برای یک زمان مشخص داده شده که در آن دوره دسترس‌پذیری محاسبه شده را، پیش بینی کرد. زمان خرابی هم برای سیستم با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

(۸) زمان خرابی= زمان عملکرد* (۱- زمان دسترسی)

با دانستن MTTR از داده های تجربی، میانگین فراوانی خرابی برای زمان داده شده می‌تواند بوسیله رابطه (۹) پیش‌بینی شود:

$$\text{فراوانی خرابی ها} = \frac{\text{زمان خرابی}}{MTTR} \qquad (۹)$$

۳. اجرای FMEA مبتنی برهزینه دوره عمر جهت بررسی خرابی‌های سگمنت در خط تولید مجتمع فولاد مبارکه

۱.۳. شرح کارکرد

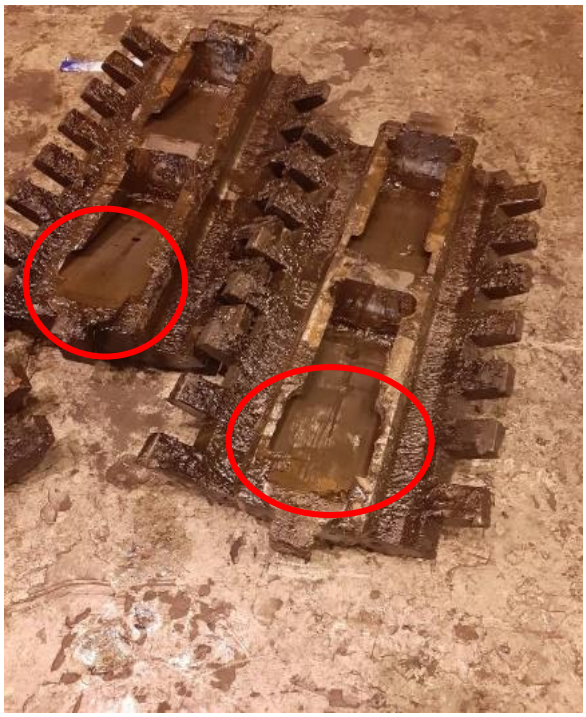
یکی از روش‌های معمول برای ذخیره‌سازی و حمل و نقل ورق‌های فولادی که در کارخانجات مختلف تولید می‌شوند، تبدیل آن‌ها به کلاف یا کویل است. کلاف‌ها یکی از اقتصادی‌ترین، مناسب‌ترین و راحت‌ترین اشکال ذخیره‌سازی ورق فولادی می‌باشند. به پیچیدن و درآوردن ورق‌ها به شکل کلاف یا کویل، اصطلاحاً کلاف‌پیچی گفته می‌شود. در واقع کلاف‌پیچی پروسه‌ای است که ورق مسطح را به شکل استوانه‌ای در می‌آورد.

عملیات کلاف پیچی توسط دستگاهی صورت می‌گیرد که تنشن ریل نامیده می‌شود. بخش اصلی تنشن ریل، مندرل است که در واقع شافتی است که ورق به دور آن پیچیده می‌شود. داخل مندرل سگمنت‌هایی قرار دارد که قابلیت تغییر قطر را برای مندرل فراهم می‌کنند. به این صورت که در هنگام پیچیدن ورق لازم است که قطر مندرل در بیشترین مقدار خود باشد. لذا سگمنت ها باز شده و مندرل اصطلاحاً چاق می‌شود. پس از پایان عملیات کلاف‌پیچی، برای اینکه بتوان کلاف را از مندرل جدا نمود لازم است که قطر مندرل کم گردد یا اصطلاحا مندرل لاغر شود. در این حالت سگمنت‌ها بسته شده و قطر مندرل کم گردد و می‌توان کویل را خارج کرد و تنشن ریل آماده پیچیدن کویل بعدی گشته و این پروسه دوباره تکرار می‌شود[18]. شکل (۱) دستگاه تنشن ریل را نشان می‌دهد.

شکل (۱): تبدیل ورق فولادی به کلاف، توسط تنشن ریل

۲.۳. کاربرد FMEA برای آنالیز خرابی‌های بوجود آمده در سگمنت

از آنجا که بوجود آمدن هرگونه ایراد در سگمنت از جمله شکستگی لبه‌های داخلی شکل (۲) و (۳)، منجر به توقف خط تولید می‌شود، هدف این است که با استفاده از FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر، به آنالیز علل این شکست پرداخته شود.



شکل (۲): سگمنت معیوب (سمت راست)- سگمنت سالم (سمت چپ)

شکل (۳): محل شکستگی در سگمنت معیوب

جدول ۶، فراوانی و مدت زمان خرابی سگمنت را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر ثبت شده در طی یکسال و در اختیار داشتن مدت زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان تعمیر سگمنت، می‌توان دسترس پذیری را محاسبه کرد:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{MTTF}{MTBF} = \frac{6960}{7008} = 0.9931$$

جدول (۶): دسترس پذیری

بازه زمانی	مدت زمان کارکرد (ساعت)	تعداد سگمنت	سگمنت ساعت	تعداد خرابی	MTBF (ساعت)	MTTR (ساعت)	دسترس پذیری
یکسال	۸۷۶۰	۴	۳۵۰۴۰	۵	۷۰۰۸	۴۸	۰/۹۹۳۱

برای افزایش دسترس‌پذیری دو راهکار وجود دارد: ۱) با کاهش میزان MTTR یعنی کاهش زمان‌های صرف شده برای تعمیر قطعه، دسترس پذیری افزایش می‌یابد. ۲) با افزایش مقدار MTTF مقدار کسر که همان دسترس پذیری است، افزایش می‌یابد.

۳.۳. جمع آوری اطلاعات:

تعداد نیروی انسانی مورد نیاز جهت باز کردن سگمنت: ۵ نفر
تعداد نیروی انسانی مورد نیاز جهت بستن سگمنت: ۵ نفر
تعداد نیروی انسانی مورد نیاز جهت تعمیر سگمنت: ۶ نفر
زمان مورد نیاز جهت تشخیص عیب: ۴ ساعت
زمان مورد نیاز جهت باز کردن سگمنت: ۱۲ ساعت
زمان مورد نیاز جهت بستن سگمنت: ۱۲ ساعت
زمان مورد نیاز جهت تعمیر سگمنت: ۲۴ ساعت
زمان تأخیر شامل زمان انجام امور اداری، حمل سگمنت به تعمیرگاه مرکزی و ...: ۸ ساعت
دستمزد نیروی انسانی برای یک ساعت هر نفر: ۶۰۰۰۰ تومان
مقدار تولید کلاف در هر ساعت : ۲۵ تن
قیمت هر کیلو کلاف درجه یک : ۲۰۰۰۰ تومان
قیمت هر کیلو کلاف درجه دو: ۱۸۰۰۰ تومان
قیمت یک شفت مرکزی: ۲۰۰ میلیون تومان
قیمت هر سگمنت: ۵۰ میلیون تومان
قیمت مجموع اتصالاتی که در مجموعه کامل بکار رفته است: ۱۰ میلیون تومان

۴.۳. تحلیل:

با توجه به جدول(۷) و مقایسه مقدار هزینه‌ها می‌توان فهمید که بیشترین هزینه مربوط به وجود پلیسه و همچنین مربوط به زمانیست که روانکاری بطور مناسب انجام نشده باشد. اشتباهات اپراتوری در مرتبه بعدی قرار می‌گیرد.
از آنجا که منشاء مشکل روانکاری، طراحی قطعه و تشخیص آن در زمان بهره برداری می‌باشد، با وجود فاصله زمانی بین طراحی و بهره‌برداری، هزینه بسیار سنگینی به مجموعه وارد می‌شود.

جدول(۷): FMEA مبتنی بر هزینه عمر سگمنت

حالت	علت اصلی خرابی	اثر خرابی	ورودی										خروجی		
			منشا	مرحله تشخیص	وقوع مجدد (ساعت)	تکرار در سال	زمان تشخیص	زمان تعمیر (ساعت)	زمان تأخیر (ساعت)	زمان از دست رفته (ساعت)	تعداد	ارزش هر سگمنت (میلیون تومان)	هزینه نیروی انسانی (میلیون تومان)	هزینه متریال (میلیون تومان)	هزینه زمان (میلیون تومان)
شکستگی سگمنت	وجود پلیسه	توقف تولید	طراحی	بهره برداری	۱۷۵۲۰	۲بار	۴	۴۸	۸	۶۰	۴	۵۰	۳۱/۶۸	۲۰	۶۰۰۰۰
	عدم روانکاری صحیح	توقف تولید	طراحی	بهره برداری	۱۷۵۲۰	۲بار	۴	۴۸	۸	۶۰	۴	۵۰	۳۱/۶۸	۲۰	۶۰۰۰۰
	خطای انسانی	توقف تولید	بهره برداری	بهره برداری	۳۵۰۴۰	۱بار	۴	۴۸	۸	۶۰	۴	۵۰	۱۵/۸۴	۱۰	۳۰۰۰۰

۵.۳. اقدام اصلاحی:

اگر در راستای کاهش ریسک‌های موجود و افزایش دسترس‌پذیری قطعه مذکور، اقدامات اصلاحی مناسبی مطابق با جدول (۸) انجام شود، قطعاً نتایج قابل توجهی مشاهده می شود. از آنجا که طبق بررسی‌ها، با سایش دو سطح فولادی پلیسه بوجود آمده و به مرور زمان شکست اتفاق می‌افتد، پس با طراحی مجدد سگمنت بطوری که سایش اتفاق نیفتد و همچنین با مقرر کردن دوره‌های زمانی مشخص جهت گریسکاری، مجموعه با این تعداد خرابی و هزینه‌های سنگین آن‌ها مواجه نخواهد بود. در واقع اقدامات اصلاحی مذکور با افزایش مقدار MTBF (یعنی کاهش تعداد خرابی‌ها به نصف مقدار کنونی)؛ باعث می شود دسترس پذیری از ۰/۹۹۳۱ به ۰/۹۹۶۵ افزایش یابد، که جزئیات مربوطه، در جدول (۹) درج شده است.

جدول (۸): اقدامات اصلاحی

علت شکستگی	اقدام اصلاحی
سایش سطوح فولادی بر روی هم که منجر به ایجاد پلیسه و به تبع آن خراشیدگی می‌شود.	نصب لاینر بر روی کف سگمنت جهت جلوگیری از ساییدگی
عدم گریسکاری مناسب	برنامه ریزی جهت گریسکاری مناسب در دوره های زمانی مشخص
عدم عملکرد صحیح اپراتور جهت کشش مناسب ورق	برنامه نویسی PLC جهت جمع شدن تدریجی ورق و ایجاد کشش مناسب

جدول (۹): دسترس پذیری پس از انجام اقدامات اصلاحی

بازه زمانی	مدت زمان کارکرد (ساعت)	تعداد سگمنت	سگمنت ساعت	تعداد خرابی	MTBF (ساعت)	MTTR (ساعت)	دسترس پذیری
دوسال	۱۷۵۲۰	۴	۷۰۰۸۰	۵	۱۴۰۱۶	۴۸	۰/۹۹۶۵

۴. نتیجه گیری:

در این مقاله روش استفاده سیستماتیک از داده‌های تجربی برای اجرای FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر و اینکه چگونه می‌توان قابلیت اطمینان، نگهداری و هزینه چرخه عمر سیستم‌های پیچیده را بهبود بخشید، نشان داده شد. گفته شد که FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر به بهبود رویه‌های نگهداری پیشگیرانه و برنامه ریزی شده کمک می‌کند. بنابراین، FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر دارای سه مزیت اصلی است: ۱_ برآورد هزینه‌های دوره عمر دستگاه. ۲_ تجزیه و تحلیل حالت‌ها و اثرات خرابی (FMEA). ۳_ تجزیه و تحلیل حالت سرویس. این روش، هزینه‌های چرخه عمر یک دستگاه که مربوط به خرابی قطعات در حین طراحی، ساخت، نصب و راه‌اندازی باشد را مهار می‌کند. به عنوان مثال در مطالعه حاضر، مطابق آنچه از جدول(۷) برمی‌آید، با حذف خرابی‌های تنها یک قطعه

(سگمنت) در طول یکسال از صرف هزینه‌ای معادل ۲۷۹/۲ میلیون تومان پیشگیری می‌شود. اگر برای تمام قطعات مهم در این صنعت از این تکنیک استفاده شود، پیش‌بینی می‌شود که میزان صرفه جویی ریالی در هزینه‌ها، بسیار قابل توجه باشد.

ریشه‌یابی دلایل خرابی، طراحان را هدایت می‌کند تا تمرکز خود را بر روی اجزای مسئله و فرآیندها بیشتر کنند. سیستم‌های پیچیده معمولاً دسترس‌پذیری را هدف قرار می‌دهند. یکی از روش‌های دستیابی به این هدف، افزایش قابلیت اطمینان همه زیرمجموعه‌هاست. هرچند، تضمین قابلیت اطمینان بالاتر، اغلب متحمل افزایش هزینه می‌شود. راه حل دیگر، برنامه زمان‌بندی، جهت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه است.

FMEA مبتنی بر هزینه دوره عمر همچنین می‌تواند فضایی را جهت مقایسه بین حالت‌های مختلف زیر مجموعه‌های یک سیستم ارائه کند. ولی ممکن است به دلیل در دسترس نبودن دانش تجربی یا تخصصی، روش پیشنهاد شده را نتوان به سادگی به تکنولوژی های جدید و یا اثبات نشده تعمیم داد. بنابراین، تحقیقات آینده می‌تواند از چالش‌های پیش رو پرده برداشته و با استفاده از داده‌های موجود به سطح بالاتری از اطلاعات تجربی و تحلیلی دست پیدا کند.

منابع

[1] S. J. Rhee and K. Ishii, (2003). “Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability,” Adv. Eng. informatics, vol. 17, no. 3–4, pp. 179–188.

[2] B. H. Lee, (2001). “Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis,” in Annual reliability and maintainability symposium. proceedings. International symposium on product quality and integrity (Cat. No. 01CH37179), 2001, pp. 7–15.

[3] MIL-STD-1629A, BS 5760 Part 5.

[4] SAE ARP-4293: Life cycle cost—techniques and applications.

[5] D. H. Stamatis,(2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. Quality Press.

[6] شریفی، م.، غلامی مزینان، ح.، شریفی، م.، کرباسیان، م. (۱۳۹۱)، مهندسی قابلیت اطمینان، ویرایش اول، تهران، امید انقلاب.

[7] S. Kmenta and K. Ishii, (2000).“Scenario-based FMEA: a life cycle cost perspective,” in International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol. 35159, pp. 163–173.

[8] C. D. Tarum, (2001). “FMERA-failure modes, effects, and (financial) risk analysis,” Citeseer.

[9] D. He and A. Adamyan, (2001). “An impact analysis methodology for design of products and processes for reliability and quality,” in International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. vol. 80241, pp. 209–217.

[10] W. Gilchrist, (1993). “Modelling failure modes and effects analysis,” Int. J. Qual. Reliab. Manag.

[11] M. Ben-Daya and A. Raouf, (1996). “A revised failure mode and effects analysis model,” Int. J. Qual. Reliab. Manag.

[12] M. Bevilacqua, M. Braglia, and R. Gabbrielli, (2000). “Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant,” Qual. Reliab. Eng. Int., vol. 16, no. 4, pp. 313–324.

[13] S. J. Rhee and K. Ishii, (2002).“file:///C:/Users/sm/Downloads/scholar(15).ris,” in International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. vol. 36231, pp. 309–318.

[14] A. Mettas, (2000). “Reliability allocation and optimization for complex systems,” in Annual reliability and maintainability symposium. . Proceedings. International symposium on product quality and integrity (Cat. No. 00CH37055). pp. 216–221.

[15] K. R. Hayes, (2002).“Identifying hazards in complex ecological systems. Part 2: infection modes and effects analysis for biological invasions,” Biol. Invasions, vol. 4, no. 3, pp. 251–261.

[16] K. Ishii, C. F. Eubanks, and P. Di Marco, (1994). “Design for product retirement and material life-cycle,” Mater. Des., vol. 15, no. 4, pp. 225–233.

[17] A. Birolini, (1997). “Qualification Tests for Components and Assemblies,” in Quality and Reliability of Technical Systems, Springer. pp. 81–113.

[18] شهریاری فر، م.(۱۳۸۸)، بررسی سیستم تنشن ریل در کلاف پیچی ورق‌های فولادی، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.