

مقایسه تطبیقی معرفی و اجرای FMEA فازی در شرایط عدم قطعیت یک مطالعه موردی

امیرحسین اخروی^{۱*} | محمد اخگری^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸۰۲۰۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸۰۵۰۲۶

چکیده

تجزیه و تحلیل حالات خرابی و اثرات ناشی از آن (FMEA)، ابزاری قدرتمند برای تشخیص و ارزیابی خرابی‌های بالقوه‌ی محصول است. مخاطرات توسط اولویت‌بندی نمرات مخاطره (RPNs) ارزیابی می‌شود. در طراحی و توسعه‌ی محصولات جدید، این روش دارای کاستی‌ها و ابهامات زیادی است؛ بنابراین، استفاده از اعداد فازی در محاسبه‌ی RPNها پیشنهاد شده است که البته پیچیدگی‌های محاسباتی را هم در بردارد. در این پژوهش با بررسی انواع ابهامات و عدم اطمینان‌هایی که در روش سنتی FMEA وجود دارد و نیز بررسی راه‌حلی که برای رفع این مشکلات در سایر پژوهش‌ها مطرح شده است، سعی در طراحی نرم‌افزار بومی در محیط اکسل شده است. این نرم‌افزار با کمک داده‌هایی که در طراحی «سامانه‌ی تهویه‌ی داخلی زیردریایی» به کار رفته است با موفقیت مورد آزمون قرار گرفت.

واژگان کلیدی:

FMEA، RPN، مجموعه‌های فازی، برنامه‌ریزی غیرخطی

۱ مقدمه

تجزیه و تحلیل حالات خرابی و اثرات ناشی از آن (FMEA) یکی از پرکاربردترین ابزار ارتقای قابلیت اطمینان و ایمنی سامانه است (رادپور و کرباسیان، ۱۳۹۰). این ابزار به‌طور خاص، در طراحی و توسعه‌ی محصولات جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد، چرا که طراحان و تولیدکنندگان هیچ‌گونه اطلاعات و سوابق آماری از عملکرد محصول جدید و خرابی‌های بالقوه از آن ندارند و تنها براساس تجربیات محصولات مشابه قبلی، اقدام به طراحی محصول می‌کنند. کاربرد این ابزار در محصولاتی وسیع‌تر می‌شود که ماهیت و ساختار پیچیده‌ای دارند، یا به عبارت دیگر، طراحی و ساخت آن‌ها، مستلزم به‌کارگیری دانش و تخصص در حوزه‌های مختلف مهندسی است. بنابراین، تشکیل تیم‌های ۵ یا ۶ نفره جهت شناسایی و سنجش مخاطرات احتمالی محصول یا سامانه ضروری است (فتاحی، ۱۳۸۸).

FMEA می‌تواند در سامانه، فرایند، طرح و یا خدمت به کار گرفته شود که تا حد ممکن خطرات بالقوه‌ی موجود، علل و اثرات مرتبط با آن را شناسایی و امتیازدهی کند (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴).

استفاده از FMEA در مباحث مدیریت محیط‌زیست برای وزن‌دهی جنبه‌ها و پیامدهای محیط‌زیستی، ارزیابی مخاطرات در موضوعات مدیریت ایمنی و بهداشت شغلی و نیز تحلیل

و خطاها در صنایع خودرو براساس الزامات استاندارد ISO/TS 16949:2002، گونه‌هایی از این به‌کارگیری است (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴). FMEA، نخستین بار در سال ۱۹۵۰ در شرکت هوایی گرومن با هدف تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم در طراحی و سایر شاخه‌های مهندسی قابلیت اطمینان گسترش یافت (براد، ۲۰۰۸). هدف کلیدی FMEA، شناسایی، اندازه‌گیری و رتبه‌بندی خرابی‌های بالقوه‌ی محصول با استفاده از اولویت‌دهی نمرات مخاطرات (RPN) است.

RPN حاصل ضرب سه عامل زیر است:

S: شدت مخاطره (میزان اثر خرابی بر روی محصول)،

O: میزان رخداد مخاطره،

D: ناتوانی در تشخیص آن.

$$RPN=S \times O \times D \quad \text{رابطه (۱)}$$

به هرکدام از این عوامل، مقداری بین یک تا ۱۰ نسبت داده می‌شود که در نهایت نمره‌ی مخاطره (RPN)، عددی بین یک تا ۱۰۰۰ است. سپس نمرات مخاطره اولویت‌بندی می‌شوند و خرابی‌های بالقوه‌ای که بزرگ‌ترین RPN را به خود اختصاص می‌دهند، مدنظر طراحان محصول و فرایند ساخت قرار می‌گیرد.

اهداف زیر را می‌توان از اهداف مهم ابزار FMEA ذکر کرد:

(۱) بهبود کیفیت، قابلیت اطمینان و ایمنی محصول،

۱. نویسنده‌ی مسئول - استادیار گروه مدیریت، مجتمع آموزش عالی گناباد

۲. دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲) کاهش زمان ورود محصول به بازار،

۳) کاهش هزینه،

۴) شناسایی مشخصات بحرانی و ویژه،

۵) شناسایی اقداماتی که می‌تواند احتمال وقوع خرابی‌های محتمل را کاهش داده یا از میان بردارد (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴).

از دیگر اهداف FMEA، کمک‌رسانی به مهندسين طراح است. اما FMEA هرگز به‌عنوان جایگزین برای مهندس طراح و نظر او در امر طراحی به‌وجود نیامده است، بلکه به‌عنوان یک ابزار برای کمک به او در جهت شناسایی خطاهای بالقوه‌ای که ممکن است آن‌ها را در نظر نگرفته باشد، عمل می‌کند. مهندس طراح بیشترین شناخت و اطلاعات را درباره‌ی طرح دارد ولی به‌عنوان یک فرد نمی‌تواند همه‌ی دیدگاه‌ها را نسبت به طرح داشته باشد. یکی از فواید انجام FMEA در قالب یک تیم، بررسی یک طرح از تمامی جنبه‌های آن است. هرکس که بتواند بر کیفیت نهایی محصول اثر بگذارد و یا از کیفیت محصول متأثر شود، می‌تواند بینش جدیدی را در شناسایی مشکلات بالقوه آن محصول ارائه کند و به جلوگیری از بروز این مشکلات کمک کند و بدین لحاظ حضور او در تیم مفید خواهد بود (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴).

از مزایای این پژوهش نسبت به روش‌های قدیمی FMEA می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) از آنجا که طراحان و تولیدکنندگان محصول هیچ‌گونه اطلاعات و سوابق آماری از خرابی‌های بالقوه‌ی محصول جدید ندارند و تنها براساس تجربیات محصولات مشابه قبلی اظهار نظر می‌کنند، ابهاماتی در خصوص مقداردهی به هر یک از این سه عامل خرابی وجود دارد؛ بنابراین، مقدار RPN‌های حاصل‌شده، نادرست و یا ناکافی است که برای کاهش این ابهامات از اعداد فازی استفاده می‌شود (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱). این در حالی است که اعداد مخاطره در FMEA سنتی، اعدادی قطعی (اعداد حقیقی) هستند که مانند اعداد فازی از دقت لازم برخوردار نیستند.

۲) در رویکرد قدیمی FMEA اعضای تیم با وجود اختلاف نظر در مورد یک مخاطره باید به یک اجماع نظر واحد برسند این در حالی است که اعضای صاحب نفوذ، ممکن است نظر خود را بر سایرین تحمیل کنند و اعداد مخاطره از اعتبار لازم برخوردار نباشد. بنابراین، سعی شده است با وجود سوابق،

ترجیحات و تخصص‌های مختلف اعضای تیم، قضاوت هر عضو راجع به یک مخاطره‌ی مشخص حفظ شود. بنابراین، در این نرم‌افزار، از مجموعه اصطلاح زبانی جهت حفظ استقلال آرا در ارزیابی مخاطره استفاده کرده‌ایم و در نهایت برای رسیدن به یک نظر واحد از مدل‌سازی غیرخطی بهره جسته‌ایم (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱).

۳) در روش محاسبه‌ی RPN فرض شده است که سه فاکتور O, S و D از اهمیت یکسانی برخوردار هستند؛ درحالی‌که در کاربردهای عملی، اوزان اهمیت آن‌ها ممکن است متفاوت باشد. بنابراین، طبق رابطه‌ی (۱) RPN نمی‌تواند بیانگر واقعی مخاطره باشد (بن‌دایا و رئوف، ۱۹۹۶).

۲ انواع FMEA

از زمانی که FMEA در دهه‌ی ۶۰ توسعه یافته است چهار نوع کلی از آن پدید آمده است:

۱) FMEA در طراحی (DFMEA)،

۲) FMEA در فرایند (PFMEA)،

۳) FMEA در سامانه (SFMEA)،

۴) FMEA در خدمات (فتاحی، ۱۳۸۸).

در تقسیم‌بندی دیگری، FMEA ماشین‌آلات را به‌عنوان دسته‌ای جداگانه در کنار سایر انواع FMEA ذکر می‌کند (فتاحی، ۱۳۸۸) که به عقیده‌ی نگارندگان این نوع را می‌توان در PFMEA دسته‌بندی کرد. در ادامه به تعریف مختصر انواع FMEA اکتفا می‌کنیم.

با وجود تفاوت‌هایی که در انواع FMEA دیده می‌شود، همه‌ی آن‌ها یک هدف را دنبال می‌کنند و آن پیشگیری از بروز خرابی یا عیب است که می‌توان DFMEA و System FMEA را به علت مشابهت در یک دسته و PFMEA و Service FMEA در دسته‌ای دیگر قرار داد (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴).

۱-۲ FMEA در سامانه^۱

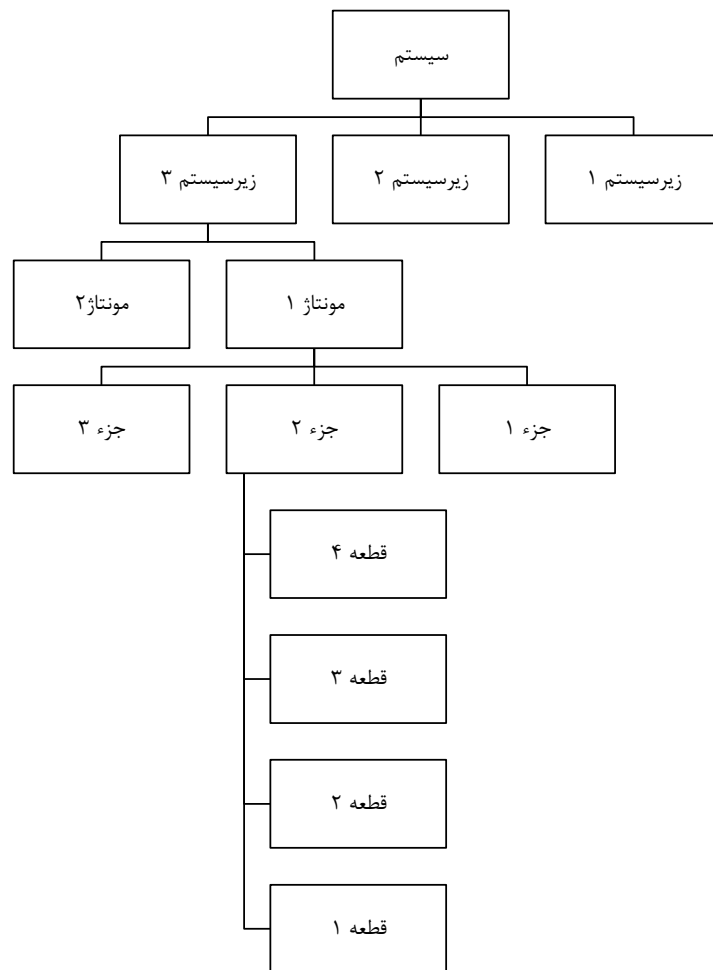
SFMEA، انجام FMEA برای یک سامانه است. SFMEA معمولاً شامل مراحل است که در برگیرنده‌ی طراحی مفهومی، طراحی تفصیلی، آزمون و ارزیابی است.

خروجی یک SFMEA، طرح مقدماتی همراه با پیکره‌بندی و مشخصات عملکردی، در جهت ترجمه‌ی الزامات مرتبط با مشخصات کیفی و کمی فرایندها و طراحی محصول است



(رضایی و همکاران، ۱۳۸۴). البته باید خاطر نشان کرد که یکی از پیش‌نیازهای تدوین SFMEA داشتن یک سامانه‌ی

شناسه‌گذاری برای محصول است که باید از قبل، درخت مونتاژ برای محصول ترسیم شود (رادپور و کرباسیان، ۱۳۹۰).



شکل ۱: شمای کلی یک سامانه‌ی شناسه‌گذاری درختی محصول

کار «فرایند تولید محصول/ خدمات» یا «در حین کار فرایند» است (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴). پنج حوزه‌ی کلیدی در فرایند عبارت است از: (۱) افراد، (۲) مواد، (۳) تجهیزات، (۴) روش‌ها، (۵) محیط (رایین و همکاران، ۱۳۹۰). شکست‌هایی که در این حوزه‌ها صورت می‌پذیرد، فهرست می‌شود و شالوده‌ی PFMEA را تشکیل می‌دهد.

۲-۴ FMEA در خدمات

FMEA در خدمات، تجزیه و تحلیلی نظم‌یافته است که به منظور شناسایی حالات خطای بالفعل یا بالقوه و برقراری اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه و پیگیری آن‌ها، قبل از آنکه خدمات واقعی یا خدمات جدید ارائه شود، است. FMEA خدمات معمولاً شامل تقابلی از موضوعات کار، ماشین، روش، مواد، اندازه‌گیری و ملاحظات محیطی است

۲-۲ FMEA در طراحی

FMEA در طراحی (DFMEA) روشی تحلیلی است که توسط تیم مهندسی مسئول طراحی به منظور شناسایی و بررسی حالات خطا و علل مرتبط با آن به کار گرفته می‌شود. DFMEA معمولاً با یک سری از مراحل شامل مؤلفه‌ها، زیرسامانه‌ها، زیرمجموعه‌ها و یا مجموعه‌های مونتاژشده همراه است. DFMEA فرایندی تکاملی است که فناوری و روش‌ها را جهت طراحی و توسعه و ایجاد محصول جدید، به طور مؤثر به کار می‌گیرد (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴).

۲-۳ FMEA در فرایند

PFMEA نیز به مانند DFMEA تجزیه و تحلیل نظم‌یافته‌ای جهت شناسایی حالات خطای بالفعل یا بالقوه و تعریف و اجرای اقدامات اصلاحی پیشگیرانه‌ی مرتبط، قبل از شروع به

(مانند PFMEA) (رضایی و همکاران، ۱۳۸۴)

البته بعضی از منابع نگاه گسترده‌تری به موضوع داشته و واحدهای ستادی را در حیطه‌ی Servise FMEA وارد می‌کنند مثلاً بخش حسابداری/ مالی، بازاریابی، منابع انسانی، خرید و تدارکات و... (رابین و همکاران، ۱۳۹۰).

۲-۵ FMEA در روش سنتی

برای تحلیل محصول یا سامانه، باید یک تیم متشکل از اعضا، با وظایف و مسئولیت‌های مختلف در سازمان تشکیل شود. اعضا می‌توانند از واحدهای طراحی، تولید، مدیریت، خدمات

و ... باشند. نخستین گام در FMEA، شناسایی تمامی حالات خرابی بالقوه‌ی محصول یا سامانه است. بعد از آن تحلیل بحرانی این حالات خرابی توسط سه عامل شدت، رخداد و آشکارسازی انجام می‌شود. به‌طور کلی، میزان مخاطره‌ی هر خرابی با RPN مشخص می‌شود که همان‌طور که در رابطه‌ی (۱) ذکر شد از حاصل ضرب سه عامل فوق محاسبه می‌شود. در محاسبه‌ی RPN مقادیر ارزیابی مخاطره برای هر خرابی در یک طیف ده‌تایی مطابق جداول پایه ای ذیل استخراج می‌شود.

جدول ۱: رتبه‌بندی با مقیاس کیفی برای تعداد رخداد خرابی (O) (زایفنگ، ۲۰۱۱)

شرح	رتبه	میزان رخداد
خرابی غیر منتظره است.	۱	تقریباً هرگز
تعداد خرابی نادر است.	۲	بعید
تعداد رخداد خرابی خیلی کم است.	۳	ناچیز
تعداد رخداد خرابی، کم است	۴	کم
تعداد رخداد خرابی اتفاقی است.	۵	نسبتاً کم
تعداد رخداد خرابی متوسط است.	۶	متوسط
تعداد رخداد خرابی متوسط رو به زیاد است	۷	متوسط رو به زیاد
تعداد رخداد خرابی زیاد است.	۸	زیاد
تعداد رخداد خرابی، خیلی زیاد است.	۹	خیلی زیاد
خرابی تقریباً همیشه اتفاق می‌افتد.	۱۰	تقریباً همیشه

جدول ۲: رتبه‌بندی با مقیاس کیفی برای شدت اثر مخاطره (S) (ژو و همکاران، ۲۰۰۲)

شرح	رتبه	اثر شدت خرابی
بی اثر	۱	هیچ
اثر خیلی ناچیز بر عملکرد محصول دارد	۲	خیلی ناچیز
اثر ناچیز بر عملکرد محصول دارد	۳	ناچیز
اثر خیلی کم بر عملکرد محصول دارد	۴	خیلی کم
اثر کم بر عملکرد محصول دارد.	۵	کم
اثر متوسط بر عملکرد محصول همراه با آسیب جزئی	۶	متوسط
اثر زیاد بر عملکرد محصول همراه با آسیب بر تجهیزات	۷	زیاد
اثر خیلی زیاد بر عملکرد محصول و موجب عمل نکردن محصول می‌شود.	۸	خیلی زیاد
اثر جدی و هنگامی است که یک خرابی بر سیستم ایمنی محصول، اثر می‌گذارد و یا هشدار همراه است، که عملیات محصول می‌بایست متوقف گردد.	۹	جدی
اثر خطرناک و هنگامی است که یک خرابی بر سیستم ایمنی محصول، اثر می‌گذارد و بدون هشدار است؛ و مربوط به ایمنی است.	۱۰	خطرناک

جدول ۳: رتبه‌بندی با مقیاس‌های کیفی برای آشکارسازی خرابی (D) (ژو و همکاران، ۲۰۰۲).

رتبه	شرح	آشکارسازی
۱	بازبینی طراحی باعث شناسایی، نوع خرابی، دلیل خرابی و پیامدهای آن می‌شود.	تقریباً همیشه
۲	شانس خیلی زیادی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	خیلی زیاد
۳	شانس زیادی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	زیاد
۴	شانس نسبتاً زیادی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	نسبتاً زیاد
۵	شانس متوسطی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	متوسط
۶	شانس کمی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	کم
۷	شانس خیلی کمی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	خیلی کم
۸	شانس بعیدی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	بعید
۹	شانس خیلی بعیدی است که بازبینی طراحی، نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	خیلی بعید
۱۰	بازبینی طراحی، نمی‌تواند نوع خرابی، علت خرابی، و پیامدهای آن را شناسایی کند.	تقریباً ناممکن

تجربیات، دانش، پیشینه و نگرش مختلفی نسبت به یک مخاطره‌ی احتمالی محصول یا سامانه دارند؛ بنابراین، نمرات متفاوتی به هریک از عوامل مخاطره (O,S,D)، تعلق می‌گیرد. سپس با روش مدل‌سازی غیرخطی، قضاوت اعضای تیم یکپارچه می‌شود که در ادامه به تفصیل توضیح می‌دهیم.

به‌طور کلی RPN‌های بالاتر هر حالت خرابی، نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی اهمیت بیشتر آن خرابی است. پس از رتبه‌بندی این اعداد، حالات خرابی که بیشترین مقدار RPN را به خود اختصاص داده‌اند در اولویت بهبود قرار می‌گیرند.

۴ شرح کلی نرم‌افزار

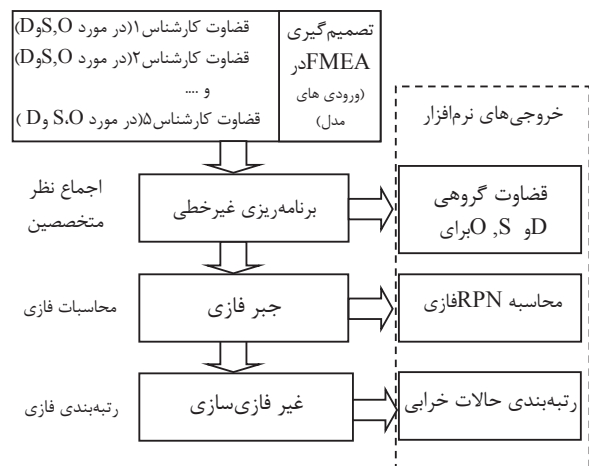
چارچوب کلی نرم‌افزار در شکل (۲) خلاصه شده است. این مدل شامل سه گام زیر است:
۱) اجماع نظر متخصصان، ۲) محاسبه‌ی RPN‌های فازی، ۳) رتبه‌بندی RPN‌ها.

۵ مجموعه اصطلاحات زبانی

همه‌ی ما تجربه‌ی سوءتفاهمات ناشی از به‌کارگیری لغات و واژه‌ها در غیر معنی اصلی خود در زندگی عادی و روزمره خویش داریم. اگر چه ممکن است در اصل معنی لغات تفاهم داشته و قادر به ارتباط نسبی و قابل قبول در اغلب موارد با همدیگر باشیم، ولی تفاهم کامل و بدون ابهام در بسیاری از مواقع بسیار مشکل و بعید به نظر می‌رسد. به عبارت دیگر، زبان طبیعی و محاوره غالباً دارای مشخصه‌ی ابهام و عدم قطعیت است (کلر، ۱۳۸۱).

پژوهشگران برای فرار از عدم قطعیت و ابهام، واژه‌های فنی و تخصصی خود را به‌طور واضح تعریف و تبیین می‌کنند ولی مجموعه‌ی این واژه‌ها به‌عنوان یک زبان مصنوعی تلقی می‌شود که توان خود را برای بیان تجربیات علمی و واقعی و چندلایه‌ی (چندبعدی) از دست می‌دهند. مثلاً فیزیک‌دانان اصولاً نیازمند توافق روی معانی اصطلاحاتی مانند نیرو، فضا و ... هستند که در عین شفافیت و قطعیت، این واژه‌ها نمی‌توانند تمامی نظرات و قضاوت‌هایی را که از آن‌ها متصور است، دربرگیرند. ولی در علوم انسانی، واژه‌ها غالباً مبهم و غیرصریح اند که قادر به پاسخ‌گویی مسائل پیچیده نیز هستند (کلر، ۱۳۸۱).

از آنجا که تیم FMEA در حال کنکاش برای یافتن خرابی‌هایی



شکل ۲: چارچوب کلی نرم‌افزار

قبل از اولین مرحله، هریک از اعضای گروه، قضاوت‌های کارشناسانه‌ی خود را برای هرکدام از خرابی‌های بالقوه (شدت خرابی، میزان رخداد خرابی و ناتوانی در آشکارسازی) که ممکن است در محصول جدید ایجاد شود، ارائه می‌دهند که به‌عنوان ورودی مدل تلقی می‌شود. از آنجا که هریک از اعضای گروه،

است که عملاً اتفاق نیفتاده است و اعضای تیم براساس تجربیات خود اعلام نظر می کنند، استفاده از واژه‌ها و اصطلاحات زبانی بسیار رایج است. سعی ما بر این است که علاوه بر مزیت‌هایی که برای واژه‌ها و اصطلاحات زبانی متصور است (توانایی اعمال تجربیات واقعی و...)، تا حد امکان، قابلیت کمی شدن را نیز داشته باشند. بدین منظور از فنون مجموعه اصطلاح زبانی استفاده شده است.

از آنجا که اعضای تیم ترجیحات و سوابق متفاوتی نسبت به مخاطرات واحدی دارند، ممکن است از مجموعه اصطلاح زبانی متفاوت با طیف‌ها و توابع عضویت مختلف برای بیان قضاوت‌هایشان راجع به اندازه‌ی مخاطره استفاده کنند (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱). تاکنون هیچ پایه و اساس علمی برای انتخاب مجموعه واژه‌های زبانی و مقادیر آن وجود ندارد (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱). این گزینش کاملاً براساس خود اعضای تیم FMEA بوده است. در این نرم‌افزار متغیرهای زبانی برای مقداردهی سه عامل شدت مخاطره، میزان رخداد و احتمال آشکارسازی آن، عبارت اند از:

خیلی کم (VL)، خیلی کم تا کم (VLL)، کم (L)، نسبتاً متوسط (ML)، متوسط (M)، متوسط روبه‌زیاد (MH)، زیاد (H)، زیاد تا خیلی زیاد (HVH)، خیلی زیاد (VH).

متغیرهای اوزان فازی شدت، رخداد و آشکارسازی عبارت‌اند از: بدون اهمیت (NI)، اندکی مهم (SI)، اهمیت متوسط (MI)، مهم (I)، خیلی مهم (VI).

هر عضو تیم FMEA، یک مجموعه اصطلاح زبانی مخصوص به‌خود را تعریف می‌کند و برای وزن‌دهی به‌عوامل مخاطره (O,S,D) مجموعه اصطلاح مجزا و واحدی تعریف می‌شود (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱). در این نرم‌افزار، با فرض پذیرش کمیته‌ی پنج نفره، درمجموع شش مجموعه اصطلاح زبانی برای بیان نظرات اعضای تیم پذیرفته می‌شود. این رویکرد به اعضای تیم کمک می‌کند تا قضاوت‌های شخصی خود را به شیوه‌ی فردی راجع به مقدار و وزن هرکدام از عوامل مخاطره بیان کنند تا با درنظرگرفتن تمامی نظرات، RPN دقیق‌تری برای هر مخاطره به‌دست آید.

به‌عنوان مثال، فرض کنید در یک تیم خبره‌ی پنج نفره، یکی از مخاطرات احتمالی که باید در فرایند طراحی سامانه‌ی تهویه لحاظ شود «ارضانشدن توان موردنیاز کمپرسور» است. هریک از اعضای تیم راجع به اثرات این مخاطره بر روی سامانه‌ی تهویه

(S) و همچنین رخداد (O) و احتمال آشکارسازی (D) آن توسط کاربر قضاوت می‌کنند. قضاوت‌ها در یک طیف نه‌تایی از خیلی کم تا خیلی زیاد هستند. حال فرض کنید تمامی قضاوت‌ها در مورد میزان اثر (S) این مخاطره بر عملکرد سامانه‌ی تهویه معادل «زیاد» باشد. با وجود اینکه تمامی کارشناسان از یک واژه‌ی مشترک جهت ارزیابی مخاطره‌ی موردنظر استفاده کرده‌اند (زیاد)، ولی در عالم واقعی، دیدگاه‌های عیناً مشابه به یکدیگر نخواهند داشت یعنی اگر عددی (مثلاً مقدار ۷) را به این متغیر زبانی (زیاد) نسبت دهیم دچار مقداری انحراف شده‌ایم. بنابراین، هریک از کارشناسان، مجموعه اصطلاح زبانی خود را برای افزایش دقت واژه‌های زبانی بیان می‌کنند.

۶ قضاوت گروهی تیم FMEA

اعضای گروه، قضاوت خود را در مورد هریک از حالات خرابی با استفاده از مجموعه اصطلاح‌های زبانی متفاوت ارائه می‌دهند. سپس، قضاوت افراد گروه برای رسیدن به اجماع نظر یکپارچه می‌شود. درجه انحراف بین قضاوت هر کارشناس و قضاوت یکپارچه‌شده را می‌توان با متغیر ذیل نشان داد:

$d^2(a^k, a)$: درجه انحراف بین قضاوت فرد k ام و قضاوت یکپارچه‌شده تیم است که بدین‌گونه تعریف می‌شود:

$$d^2(a^k, a) = \frac{(a_i^k - a_i)^2 + (a_m^k - a_m)^2 + \dots + (a_u^k - a_u)^2}{4}$$

که در آن این رابطه:

k: تعداد اعضای تیم FMEA،

a^k : قضاوت متخصص k ام در مورد O یا S یا D،

a: قضاوت یکپارچه‌شده تیم در مورد O یا S یا D.

شایان ذکر است که متغیر تصمیم a و a^k ، اعداد فازی دوزنقه‌ای هستند که البته a^k می‌تواند عدد فازی مثلثی نیز باشد؛ چراکه عدد فازی مثلثی، شکل خاصی از عدد فازی دوزنقه‌ای است که

$$\text{در آن } a_m^k = a_M^k$$

$a = (a_1, a_m, a_M, a_u)$ متغیر تصمیم و یک عدد فازی دوزنقه‌ای است.

$a^k = (a_i^k, a_m^k, a_M^k, a_u^k)$ شاخص و یک عدد فازی دوزنقه‌ای است (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱).

پس از حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ذیل به ازای هر حالت خرابی، متغیر تصمیم a که همان شدت، رخداد یا آشکارسازی خرابی موردنظر است، به‌دست خواهد آمد (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱).



$$\min D = \sum_{k=1}^{k=5} v_k \times d^2(a^k, a)$$

$$St : 0 \leq a_l^k \leq a_m^k \leq a_M^k \leq a_u^k \leq 1$$

U_k : ارزش (قضاوت) متخصص k ام در تیم.

۷ محاسبه‌ی RPN فازی

برخلاف FMEA سنتی، از آنجا که ممکن است میزان اهمیت هر کدام از عوامل مخاطره (D و O، S) متفاوت باشد، به هر کدام وزنی تعلق می‌گیرد تا نمره‌ی مخاطره‌ی مورد نظر به واقعیت نزدیک‌تر باشد (بن‌دایا و رئوف، ۱۹۹۶). بنابراین، رابطه‌ی RPN به صورت زیر تغییر می‌یابد:

WS: میزان اهمیت (وزن) نمره‌ی شدت مخاطره،

WO: میزان اهمیت (وزن) نمره‌ی رخداد مخاطره،

WD: میزان اهمیت (وزن) نمره‌ی ناتوانی در شناسایی مخاطره.

$$W_1 = \frac{W_S}{(W_S + W_O + W_D)}$$

$$W_2 = \frac{W_O}{(W_S + W_O + W_D)}$$

$$W_3 = \frac{W_D}{(W_S + W_O + W_D)}$$

$$RPN = S^{W_1} \times O^{W_2} \times D^{W_3}$$

لازم به ذکر است اعداد S، O و D و اوزان آن‌ها، اعداد فازی هستند که توسط کارشناسان مشخص می‌شوند. به منظور تسهیل در محاسبه‌ی رابطه‌ی توانی فوق، از طرفین معادله‌ی (۲) لگاریتم طبیعی می‌گیریم.

$$\ln(RPN) = W_1 \times \ln S + W_2 \times \ln O + W_3 \times \ln D$$

$$RPN = e^{(W_1 \times \ln S + W_2 \times \ln O + W_3 \times \ln D)}$$

۸ غیرفازی‌سازی RPNها جهت رتبه‌بندی آنها

در مرحله‌ی قبل، نمره‌ی مخاطره برای هر خرابی بالقوه‌ی محصول، به دست آمد. در این مرحله، خرابی‌های بالقوه برحسب بزرگ‌ترین نمرات مرتب می‌شوند تا در طراحی محصول یا سامانه، مخاطرات با نمرات بالا، مدنظر طراحان و تولیدکنندگان محصول قرار گیرند. برخلاف FMEA سنتی، این نمرات، حقیقی نبوده (بین ۱ تا ۱۰۰۰) بلکه مقادیری فازی هستند. در نرم‌افزار طراحی شده از روش رایج

«غیرفازی‌سازی» جهت تبدیل RPNهای فازی به RPNهای حقیقی استفاده کردیم تا بتوانیم به راحتی RPNهای حقیقی را رتبه‌بندی کنیم. شایان ذکر است بیش از ۳۰ روش برای غیرفازی‌سازی وجود دارد که ما از روش «میانگین ماکسیمم» بهره جستیم (خاتمی و رنجبر، ۱۳۸۷).

۹ مطالعه‌ی موردی

مطالعه‌ی میدانی بر روی «سامانه‌ی تهویه‌ی داخلی زیردریایی» در یکی از پژوهشکده‌های وزارت دفاع انجام شد.

انرژی مورد نیاز زیردریایی مورد نظر از طریق باتری‌های سرب-اسیدی تأمین می‌شود. یکی از معضلات استفاده از این باتری‌ها، تولید گاز هیدروژن است چراکه این گاز در غلظت بیش از چهار درصد با احتمال بسیار بالایی منفجر می‌شود؛ بنابراین، باید از اتمسفر زیردریایی حذف شود. سامانه‌ی تهویه‌ی داخلی منجر به حذف این گاز خطرناک می‌شود. بنابراین، عملکرد آن نقش کلیدی را در زیردریایی ایفا می‌کند که مستلزم طراحی و ساخت با قابلیت اطمینان بالاست.

فن سانتریفوژ، فن پروانه‌ای، والو کروی، والو پروانه‌ای، سپریتور آب‌وهوا، لیمت سوئیچ، چیلر و... اجزای اصلی سامانه‌ی تهویه‌ی داخلی هستند.

اطلاعات جمع‌آوری شده از عوامل مخاطرات سامانه، حاصل همفکری مسئول پروژه، مشاور فنی و سایر کارشناسان خبره است. از آنجا که گروه‌های اثربخش FMEA تیم‌هایی متشکل از ۵ یا ۶ نفره است (فتاحی، ۱۳۸۸)، تعداد اعضای تیم پنج نفر تعیین شد که هر کدام از اعضا، در شیوه‌ی قضاوت راجع به مخاطرات سامانه، وزن مخصوص به خود را می‌گیرند. بردار اهمیت وزنی اعضای تیم برابر با ۰٫۱۵، ۰٫۲، ۰٫۲۵، ۰٫۱ و ۰٫۳ تعیین شد (زایفنگ و ژوئینگ، ۲۰۱۱). در دنیای واقعی، هر عضو تصمیم‌گیرنده در مقایسه با سایر اعضا، ممکن است از مجموعه اصطلاح زبانی مشابه یا متفاوتی استفاده کند تا بدین طریق ارزیابی خود را بیان کند. بدین منظور فرض شده است که اعضای تیم قضاوت‌های خود را در پنج مجموعه اصطلاح زبانی بیان می‌کنند (به ترتیب S1، S2،... S5) و ششمین مجموعه اصطلاح زبانی (S6) برای ارزیابی اهمیت سه فاکتور O، S و D نسبت به همدیگر در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: مجموعه اصطلاح زبانی اعضای تیم FMEA

S^1	FNs	S^2	FNs	S^3	FNs
s_1^1 - VL	(1, 1, 1.2)	s_1^2 - VL	(1, 1, 1.6)	s_1^3 - VL	(1, 1, 2)
s_2^1 - VLL	(1, 1.2, 2.5)	s_2^2 - L	(1, 1.6, 3.3)	s_2^3 - VLL	(1, 2, 3)
s_3^1 - L	(1.2, 2.5, 3.7)	s_3^2 - ML	(1.6, 3.3, 5)	s_3^3 - L	(2, 3, 4)
s_4^1 - ML	(2.5, 3.7, 5)	s_4^2 - M	(3.3, 5, 6.6)	s_4^3 - ML	(3, 4, 5)
s_5^1 - M	(3.7, 5, 6.2)	s_5^2 - MH	(5, 6.6, 8.3)	s_5^3 - M	(4, 5, 6)
s_6^1 - MH	(5, 6.2, 7.5)	s_6^2 - H	(6.6, 8.3, 10)	s_6^3 - MH	(5, 6, 7)
s_7^1 - H	(6.2, 7.5, 8.7)	s_7^2 - VH	(8.3, 10, 10)	s_7^3 - H	(6, 7, 8)
s_8^1 - HVH	(7.5, 8.7, 10)			s_8^3 - HVH	(7, 8, 9)
s_9^1 - VH	(8.7, 10, 10)			s_9^3 - VH	(8, 9, 10)
S^4	FNs	S^5	FNs	S^6	FNs
s_1^4 - VL	(1, 1, 1, 1.1)	s_1^5 - VL	(1, 1, 1, 1)	s_1^6 - NI	(0, 0, 0, 0.25)
s_2^4 - L	(1, 1.1, 1.8, 2.3)	s_2^5 - VLL	(1, 1, 1.2, 1.7)	s_2^6 - SI	(0, 0.25, 0.5)
s_3^4 - ML	(1.1, 1.5, 2.5, 3.5)	s_3^5 - L	(1.1, 1.2, 1.8, 2.3)	s_3^6 - MI	(0.25, 0.5, 0.75)
s_4^4 - M	(2.5, 4, 6, 6.5)	s_4^5 - ML	(1.7, 2.2, 3.6, 4.2)	s_4^6 - I	(0.5, 0.75, 1)
s_5^4 - MH	(5.8, 6.3, 8, 8.6)	s_5^5 - M	(3.2, 4.1, 5.8, 6.5)	s_5^6 - VI	(0.75, 1, 1)
s_6^4 - H	(7.5, 9, 9.5, 9.9)	s_6^5 - MH	(5.8, 6.3, 8, 8.6)		
s_7^4 - VH	(9, 10, 10, 10)	s_7^5 - H	(7.2, 7.8, 9.2, 9.7)		
		s_8^5 - HVH	(9.3, 9.8, 9.9, 10)		
		s_9^5 - VH	(10, 10, 10, 10)		

هر کدام از اعضای تیم FMEA، راجع به نه حالت مخاطره‌ی فوق قضاوت کردند که این قضاوت‌ها مربوط به شدت (S)، میزان رخداد (O) و آشکارسازی (D) مخاطرات نه‌گانه است. همچنین اوزان اهمیت سه عامل (S، O و D) توسط اعضا مشخص شد. جدول ذیل یکی از ورودی‌های اطلاعات نرم‌افزار است که قضاوت‌های هریک از اعضای تیم را (DMها) در مورد «میزان رخداد» هریک از حالات خرابی نشان می‌دهد. همچنین اهمیت این عامل (میزان رخداد خرابی) نسبت به دو عامل دیگر (شدت و آشکارسازی) در سطر پایینی جدول نشان داده شده است.

۹ حالت خرابی عمده توسط اعضای تیم شناسایی شد که عبارت‌اند از:

- خرابی محفظه‌ی سپریتور،
- عدم انطباق فلانچ با لوله‌ی فن ساحلی،
- عدم تأمین دبی مورد نیاز شیر پروانه‌ای،
- خوردگی شیر فلانچی کروی،
- اشکال در اتصالات برقی الکتروموتور فن مکنده،
- جام کردن شیر اتصال کینگستون،
- اعمال توان به الکتروموتور بیش از توان نامی،
- لرزش بیش از حد شاسی چیلر،
- نیم‌سوز شدن موتور الکتریکی فن مکنده و دمنده.

جدول ۵: ورودی نرم‌افزار، قضاوت تیم پنج نفره برای شدت حالات خرابی

صاحب نظران	نظرات افراد راجع به شدت خرابی در ۹ خرابی مورد بررسی				
	صاحب نظر ۱	صاحب نظر ۲	صاحب نظر ۳	صاحب نظر ۴	صاحب نظر ۵
خرابی محفظه سپریتور	کمتر از متوسط	بیشتر از متوسط	کمتر از متوسط	متوسط	متوسط
عدم انطباق فلانچ با لوله فن ساحلی	بیشتر از متوسط	بیشتر از متوسط	زیاد	متوسط	زیاد
عدم تأمین دبی مورد نیاز شیر پروانه‌ای	بیشتر از متوسط	متوسط	زیاد	بیشتر از متوسط	متوسط
خوردگی شیر فلانچی کروی	متوسط	بیشتر از متوسط	کمتر از متوسط	متوسط	متوسط
اشکال در اتصالات برقی الکتروموتور فن مکنده	متوسط	زیاد	بیشتر از متوسط	بیشتر از متوسط	متوسط
جام کردن شیر اتصال کینگستون	زیاد	زیاد	بیشتر از متوسط	بیشتر از متوسط	زیاد
اعمال توان به الکتروموتور بیش از توان نامی	بیشتر از متوسط	بیشتر از متوسط	زیاد	بیشتر از متوسط	بیشتر از متوسط
لرزش بیش از حد شاسی چیلر	خیلی زیاد	زیاد	خیلی زیاد	زیاد	بیشتر از زیاد
نیم‌سوز شدن موتور الکتریکی فن مکنده و دمنده	کمتر از متوسط	متوسط	کمتر از متوسط	کمتر از متوسط	متوسط

با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی این قضاوت‌ها یکپارچه می‌شود که اولین خروجی نرم‌افزار، برابر جدول ذیل، برای هر سه عامل مخاطره (O,S,D) و اوزان آن‌ها به دست می‌آید.



شکل ۸: اولین خروجی نرم افزار، قضاوت گروهی اعضای تیم

عنوان خرابی	رخداد	شدت	تشخیص
خرابی محفظه سپریتور	(6.56 5.54 4.86 3.75)	(6.26 5.22 4.50 3.33)	(4.45 3.40 2.88 2.12)
عدم انطباق فلانچ با لوله فن ساحلی	(8.03 7.02 6.34 5.37)	(8.35 7.36 6.74 5.66)	(6.85 5.79 5.11 4.04)
عدم تامین دبی مورد نیاز شیر پروانه ای	(5.35 4.30 3.59 2.40)	(7.26 6.22 5.54 4.45)	(8.75 7.74 7.05 6.07)
خوردگی شیر فلانچی کروی	(5.48 4.46 3.76 2.55)	(6.44 5.41 4.70 3.51)	(2.72 1.88 1.75 1.12)
اشکال در اتصالات برقی الکتروموتور فن مکنده	(6.03 5.00 4.29 3.08)	(7.49 6.45 5.77 4.66)	(3.05 2.07 1.94 1.15)
جام کردن شیر اتصال کینگستون	(7.27 6.24 5.55 4.47)	(8.83 7.85 7.25 6.24)	(3.50 2.58 2.52 1.74)
اعمال توان به الکتروموتور بیش از توان نامی	(9.18 8.18 7.60 6.61)	(8.22 7.20 6.52 5.57)	(6.80 5.77 5.06 3.87)
لرزش بیش از حد شاسی چیلر	(4.68 3.64 3.11 2.15)	(9.99 9.33 9.25 8.17)	(3.67 2.68 2.43 1.62)
نیم سوز شدن موتور الکتریکی فن مکنده و دمنده	(6.10 5.09 4.38 3.17)	(5.62 4.54 3.93 2.85)	(5.36 4.33 3.81 2.83)
درجه اهمیت	(0.85 0.60 0.60 0.35)	(1.00 0.83 0.83 0.58)	(0.49 0.02 0.02 0.03)

مطابق با رابطه‌ی (۴) مقدار تقریبی RPN برای هر حالت خرابی به دست آمد که نتیجه در جدول (۹) قابل مشاهده است.

شکل ۹: دومین خروجی نرم افزار، محاسبه‌ی RPN فازی

RPN	عنوان خرابی
(3.13 1.31 2.46 2.28)	خرابی محفظه سپریتور
(3.03 2.26 2.59 2.44)	عدم انطباق فلانچ با لوله فن ساحلی
(2.34 1.84 2.07 1.84)	عدم تامین دبی مورد نیاز شیر پروانه ای
(3.20 1.48 2.47 2.31)	خوردگی شیر فلانچی کروی
(3.30 1.50 2.61 2.48)	اشکال در اتصالات برقی الکتروموتور فن مکنده
(3.42 1.75 2.78 2.69)	جام کردن شیر اتصال کینگستون
(3.13 1.67 2.65 2.50)	اعمال توان به الکتروموتور بیش از توان نامی
(3.23 1.62 2.65 2.56)	لرزش بیش از حد شاسی چیلر
(2.94 1.36 2.29 2.10)	نیم سوز شدن موتور الکتریکی فن مکنده و دمنده

پس از غیر فازی سازی RPN ها به روش «میانگین ماکسیمم» به ترتیب حالات خرابی ذیل در اولویت بهبود قرار می گیرند.

شکل ۱۰: سومین خروجی نرم افزار، غیر فازی سازی و رتبه بندی RPN ها

RPN	عنوان خرابی
2.42015	عدم انطباق فلانچ با لوله فن ساحلی
2.26781	جام کردن شیر اتصال کینگستون
2.16228	اعمال توان به الکتروموتور بیش از توان نامی
2.13817	لرزش بیش از حد شاسی چیلر
2.05224	اشکال در اتصالات برقی الکتروموتور فن مکنده
1.97489	خوردگی شیر فلانچی کروی
1.95224	عدم تامین دبی مورد نیاز شیر پروانه ای
1.88661	خرابی محفظه سپریتور
1.82374	نیم سوز شدن موتور الکتریکی فن مکنده و دمنده

۱۰ نتیجه گیری

ارزیابی عوامل مخاطره (D و O، S)، نظریه مجموعه‌های فازی جهت محاسبه‌ی RPN پیشنهاد شده است. با وجود این نواقص و ابهاماتی در فرایند تصمیم‌گیری تیم FMEA وجود دارد که باعث تشخیص نادرست مخاطرات احتمالی محصول

نمره‌ی اولویت‌دهی خرابی‌ها (RPN) به‌طور گسترده‌ای در FMEA برای تعیین و ارزیابی‌های حالات خرابی به کار می‌رود. به دلیل ابهامات و عدم اطمینان‌های موجود در فرایند

of Quality and Reliability Management, 13(1), 43-47
 Stamatis, D. H. (1995). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. Milwaukee, WI: ASQC Quality Press
 Xu, K., Tang, T. C., Xie, M., Ho, S. L., & Zhu, M. L. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. Reliability Engineering & System Safety, 75, 17-29.

می‌شود که می‌توان به قضاوت‌های متفاوت افراد گروه (به‌علت تخصص‌ها، سوابق و تجربیات متفاوت) و تفاوت اوزان عوامل مخاطره اشاره کرد. بنابراین، در این تحقیق، یک مدل ترکیبی سه بخشی پیشنهاد شده است. پس از بحث پیرامون مدل، به کمک متغیرهای واقعی که مرتبط با طراحی سامانه‌ی تهنویسی داخلی زیردریایی بود در یکی از پژوهشکده‌های وزارت دفاع با موفقیت مورد آزمون قرار گرفت.

هرچند اجرای FMEA به روش سنتی آن بسیار معمول و آسان است ولی محققان در شرایط عدم اطمینان نباید از روش‌های رایج آن استفاده کنند.

پیشگیری محصول، شناخت و تجربه‌ی ناکافی در طراحی محصولات جدید و محصولات با قابلیت اطمینان بسیار بالا (به‌ویژه محصولات نظامی)، شرایط عدم اطمینان را برای طراحان، مهندسان و سازندگان محصول ایجاد می‌کند که باید متناسب با این شرایط از ابزار دقیق‌تری جهت کاهش عدم قطعیت‌ها به کار گرفت.

۱۲ مراجع

رادپور، ح؛ کرباسیان، م؛ (۱۳۹۰)، "مجموعه ابزار مهندسی سیستم"، اصفهان، انتشارات ارکان دانش
 فتاحی، پ، (۱۳۸۸)، "مدیریت کیفیت و بهره‌وری"، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۴۲-۱۵۷.
 رضایی، ک؛ سیدی، م؛ نوری، ب؛ (۱۳۸۴)، "تجزیه و تحلیل خطا و اثرات ناشی از آن"، انتشارات RWTU viran.
 رابین‌ای. مک درموت؛ ریموند. جی. میکولاک؛ میشائیل. ار. بیوریگارد؛ (۱۳۹۰)، اصول FMEA، انتشارات کیان رایانه سبز جی. ج. کلر، یو. اس. کلر، ب. یو. آن؛ (۱۳۸۱)، "نظریه مجموعه‌های فازی"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 خاتمی، ح؛ رنجبر م؛ (۱۳۸۷)، "مبانی مدل سازی فازی؛ جلد اول: جبر فازی"، کرمان، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.
 Brad, S. (2008), "Complex system design technique", International Journal of Production Research
 Zaifang Z., Xuening C., (2011), "Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty", Journal of Expert systems with applications, 206-214.
 Ben-Daya, M., & Raouf, A. (1996). A revised failure mode and effects analysis model. International Journal

Introduction & implementation of Fuzzy FMEA under uncertainty: A case study

Amir Hossein Okhravi^{1*} | Mohammad Akhgari²

Received: 2019-05-12

Accepted: 2019-08-17

Abstract

Failure modes and effects analysis (FMEA) is a powerful tool for identifying and assessing potential failures in products. Generally risk assessment in FMEA is carried out by using risk priority numbers (RPNs). As a design and development of new products, this method has many shortcomings and ambiguities, therefore the applying of fuzzy numbers for the calculation of RPNs, is proposed that computational complexity is also encompassed.

In this research, examining the kind of ambiguities and uncertainties that exist in the traditional FMEA as well as solutions to overcome the problems have been addressed in other research. Also we developed the software in excel application. This software is successfully tested with real data on the design and development of the “internal ventilation system” of a submarine.

Keywords: FMEA, RPN, Fuzzy sets, Nonlinear programming



1. Corresponding author - Assistant Professor, Department of Management, University of Gonabad, Iran,
Email: okhravi@gonabad.ac.ir
2. Graduate in Industrial Management, Ferdowsi University of Mashhad
Email: Akhgari33002@gmail.com