

رویکردی ترکیبی برای اولویت‌بندی ریسک براساس تحلیل خطا و نقشه‌شناختی فازی (مطالعه موردی: صنعت قطعات خودرویی)

مصطفی جهانگشای رضائی^{۱*}، ساموئل یوسفی^۲، مجید باقری^۳

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه

۳. کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبایی

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۱۸، تاریخ روایت اصلاح‌شده ۹۶/۰۸/۲۷، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۹/۲۹)

چکیده

افزایش رقابت، گسترش توقعات، تقاضای مکرر مشتری و تغییرات سریع فناوری، سبب رشد سریع تعهدات تولیدکنندگان امروزی شده است؛ به نحوی که هر کمبود و انحراف در عملکرد محصول تولیدی، به از دست دادن سهم بازار تولیدکننده می‌انجامد. برای رفع معضل موجود و بهبود کیفیت محصولات، باید به شناسایی خطاهای موجود پرداخت. در این پژوهش، بررسی روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن، با کمک تیم چندتخصصی در صنعت قطعات خودرویی صورت گرفت و خطاهای بالقوه شناسایی شد. سپس برای دستیابی به نتایجی مطابق با واقعیت و رفع ایرادات موجود در عدد اولویت ریسک، ارتباط درونی میان خطاهای مورد شناسایی در نظر گرفته شد؛ زیرا ممکن است وقوع و کنترل هر خطا بر سایر خطاها اثرگذار باشد. به بیان دیگر، اولویت‌بندی خطاها براساس روش نقشه‌شناختی فازی با در نظر گرفتن سه معیار شدت، احتمال وقوع و احتمال تشخیص، همچنین ارتباط درونی هر خطا با سایر خطاها صورت می‌گیرد. بررسی موردی در خصوص واحد تولیدی قطعات خودرو، نشان‌دهنده توانایی رویکرد ارائه‌شده در اولویت‌بندی خطاها با استفاده از یکپارچه‌سازی تجزیه و تحلیل حالات خطا و نقشه‌شناختی است.

واژه‌های کلیدی: اولویت‌بندی ریسک، روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن، قطعات خودرو، نقشه‌شناختی فازی.

مقدمه

بهبود مستمر، تأکید بر جلوگیری از بروز عیب و کاهش نوسانات و ضایعات در اغلب سازمان‌های تولیدی، استفاده از روش‌های تحلیلی ارزیابی ریسک را در این سازمان‌ها گسترش داده است تا رقابت‌پذیری محصولات تولیدی آن‌ها در بازار، و سهم فعلی این تولیدات حفظ شود. در واقع، این سازمان‌ها با استفاده از روش‌های ارزیابی ریسک می‌کوشند تا حد ممکن به شناسایی و اولویت‌بندی خطرات بالقوه موجود در محدوده‌ای که در آن ارزیابی ریسک انجام می‌شود، همچنین علل و اثرات مرتبط با آن‌ها بپردازند. در این میان، استفاده از روشی متداول مانند تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن (FMEA^۱) ممکن است اثرگذاری زیادی برای حصول اطمینان از روانه‌کردن محصولی بی‌عیب و قابل‌رقابت در بازار داشته باشد. روش تجزیه و

تحلیل حالات خطا و آثار آن در فرایند PFMEA^۲، روشی سیستماتیک برای شناسایی و پیشگیری از وقوع مشکل در محصول و فرایند آن و روش تحلیلی متکی بر قانون پیشگیری قبل از وقوع است که برای شناسایی عوامل بالقوه خطا به کار می‌رود. توجه این روش بر بالابردن ضریب امنیت و درنهایت رضایت مشتری با پیشگیری از وقوع خطاست.

روش PFMEA، تکنیک تجزیه و تحلیل است که به‌طور معمول به‌منظور واکاوی تولید و فرایند مونتاژ در سیستم، زیرسیستم یا سطوح اجزا به کار می‌رود. همچنین، استاندارد SAE-J-1739 به‌عنوان استاندارد مرجع FMEA در صنایع خودرو معرفی می‌شوند. افزون‌براین، در سال‌های اخیر، سیستم‌های تضمین کیفیت در صنعت خودروسازی با وضع استاندارد QS-9000 در صنعت

و تشخیص هر خطا، همچنین روابط درونی میان خطاها صورت گرفت. درواقع، عمده نوآوری‌های این پژوهش در سه بخش استفاده از نقشه‌شناختی در ارزیابی خطاها، ترکیب روش تجزیه و تحلیل خطا و اثرات آن با نقشه‌شناختی فازی و ارائه رویکرد فرایندگرا برای واکاوی خطاها بیان شد. همچنین خطاهای موجود در سه فرایند تولید قطعات خودرو به وسیله شاخص حاصل از روش پیشنهادی FMEA-FCM برای اعتبارسنجی شاخص پیشنهادی اولویت‌بندی شد.

در بخش ۲ پژوهش، پیشینه کاربردی روش FMEA بررسی شد. در بخش‌های ۳ و ۴، مقدمه‌ای از روش‌های PFMEA و نقشه‌شناختی فازی مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش ۵، رویکرد پیشنهادی پژوهش ارائه، و در بخش ۶، تحلیل نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی برای مطالعه موردی بیان شد. نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی نیز در بخش ۷ قرار گرفت.

مروری بر مطالعات پیشین

روش FMEA یکی از روش‌های تجربه‌شده برای شناسایی، طبقه‌بندی، تجزیه و تحلیل خطاها و ارزیابی مخاطرات و ریسک‌های ناشی از آنهاست. به کمک این روش می‌توان خطاها را ریشه‌یابی، و از بروز آنها جلوگیری کرد. در ابتدا، این روش تنها برای تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن در محصولات هسته‌ای، خودرویی، شیمیایی و مکانیکی استفاده می‌شد، اما با گذشت زمان در صنایع خدماتی مانند صنایع نرم‌افزاری به کار گرفته شد [۲]. پژوهش‌های متعددی درباره استفاده از روش FMEA انجام شده است که در این بخش به برخی از آنها می‌پردازیم.

در پژوهشی، روش FMEA به منظور ایجاد سیستم بهداشتی کارآمد برای مدیریت کیفیت در صنایع غذایی به کار گرفته و روشی برای استفاده در انواع شرکت‌های تولیدکننده مواد غذایی ارائه شد [۳]. علاوه بر این، روش FMEA برای تجزیه و تحلیل ریسک و کاهش تأثیرات آن برای افزایش ایمنی در سایر صنایع به کار رفت. از این روش برای واکاوی سیستم‌های بحرانی ایمنی نیز استفاده شد [۴].

در پژوهشی دیگر در این زمینه، از رویکردی توسعه‌یافته مبتنی بر روش‌های FMEA و تحلیل پوششی داده‌های استوار برای اولویت‌بندی ریسک‌های ایمنی،

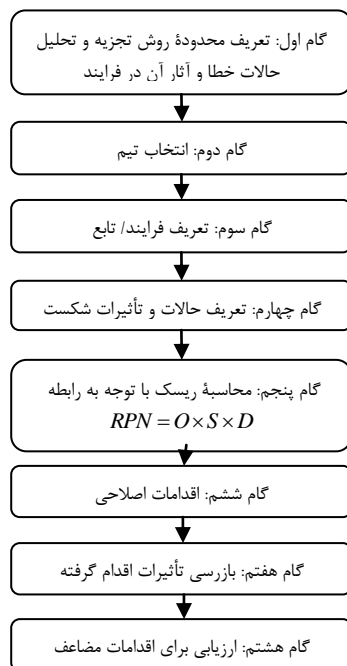
خودرو آمریکا و صنایعی که به طور عمیق بر تولید تمرکز دارند توسعه یافته‌اند؛ به ویژه زمانی که فرایند، امنیت انسانی را هم شامل شود. روش PFMEA به طور عمده بر آثار و حالات خطای فرایندی تمرکز دارد که از نقص و عیوب فرایند مونتاژ و تولید بهره می‌گیرند؛ از این رو در فرایند تولید قطعات خودرو اهمیت ویژه‌ای دارند؛ به گونه‌ای که این توجه ویژه به هر مرحله از فرایند می‌تواند به خطر امنیتی یا خطای ناشی از عملکرد اپراتور یا ماشین در تولید و مونتاژ منجر شود، اما این خطاها در آینده رخ می‌دهند و تشخیص، وقوع و تأثیرات آنها فرایندهایی احتمالی هستند؛ زیرا بر پایه برخی پیش‌بینی‌ها انجام می‌شوند؛ از این رو در آنالیز کمی سه فاکتور شدت (S)، احتمال وقوع (O) و احتمال تشخیص خطا (D) باید در نظر گرفته شود. حاصل ضرب این سه فاکتور، کمیتی به نام عدد اولویت ریسک (RPN) به وجود می‌آورد که در تحلیل‌های بعدی مفید است و تصمیم‌گیری براساس آن صورت می‌گیرد. در نتیجه، بررسی سه فاکتور مذکور برای اولویت‌بندی خطاها از موارد مهم، به ویژه در فرایندهای تولید قطعات صنعت خودروسازی است.

یکی از اهداف مورد نظر این پژوهش، شناسایی و اولویت‌بندی خطاها در سیستم تولیدی با تمرکز بر صنعت قطعات خودرویی است. در بیشتر پژوهش‌های پیشین، شناسایی خطاها و رتبه‌بندی آنها براساس امتیاز RPN انجام شده است، اما با توجه به مشکلات این شاخص، به شاخص جدیدی برای اولویت‌بندی خطاها نیاز است. متأسفانه تمامی روش‌های مرتبط با RPN، تلاش برای رسیدن به بهبود را بر حالت خطایی متمرکز می‌کنند که امکان دارد با داشتن RPN بالاتر، وخامت کمتری از سایر خطاهایی با RPN پایین‌تر داشته باشد [۱]. یکی دیگر از مشکلات اساسی شاخص RPN، در نظر نگرفتن روابط درونی میان خطاهاست که می‌تواند اولویت رسیدگی به خطاها را تغییر دهد؛ زیرا در واقعیت برخی خطاها از خطاهای دیگر اثر می‌پذیرند یا بر آنها اثر می‌گذارند؛ بنابراین در این پژوهش، شاخص به دست آمده از رویکرد ترکیبی براساس روش نقشه‌شناختی (FCM) برای تعدیل شاخص RPN و اولویت‌بندی خطاها پیشنهاد شد؛ امتیازی که محاسبه آن با در نظر گرفتن سه معیار RPN یعنی شدت، احتمال وقوع

شود. باید توجه داشت که PFMEA خطرات ناشی از خطاها را از راه‌های زیر کاهش می‌دهد:

«شناسایی حالات بالقوه خطا در فرایند مرتبط با محصول»، «ارزیابی شدت تأثیرات خطا در مشتری»، «شناسایی علت‌های بالقوه موجود در فرایند ساخت و مونتاژ و شناسایی تغییرات فرایند»، «ایجاد فهرست مرتب‌شده از حالات خطای بالقوه» و «مستندکردن نتایج فرایند ساخت یا مونتاژ» در فرایند.

با توجه به شکل ۱، حاصل ضرب سه فاکتور کمیتی شدت، احتمال وقوع و کشف عددی به نام RPN به وجود می‌آورد. همچنین، تمامی فاکتورهای مذکور به‌صورت رتبه‌ای از ۱ تا ۱۰ بیان می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که امتیاز ۱۰ برای یک خطا از نظر فاکتور شدت به معنی بسیار خطرناک، از نظر فاکتور احتمال وقوع به معنی یقیناً، و از نظر احتمال تشخیص خطا به معنی غیرقابل‌شناسایی است [۱۰]. نحوه امتیازدهی این فاکتورها ممکن است به تناسب هر سازمان تنظیم شود. PFMEA با تأکید بر سیستم جلوگیری از بروز خطا به بهبود فرایند کمک می‌کند؛ به نحوی که خطاهای پرریسک با توجه به نظر اعضای تیم، مشخص و برنامه‌آجرائی برای جلوگیری از بروز آن‌ها ارائه می‌شود.



شکل ۱. متدولوژی تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن در فرایند

بهداشت و محیط کار در صنعت خودرویی استفاده شد [۵]. روش FMEA به‌منظور بررسی قابلیت اطمینان در بسیاری از سیستم‌های مختلف تولید برق مانند سیستم توربین بادی به‌کار رفت [۶]. در ادامه، به‌منظور توسعه روش FMEA برای بهبود عملکرد صنایع مختلف و جلوگیری از خطاها، روش FMEA با روش‌های دیگر ترکیب شد. این مسئله یکی از دلایل اصلی به‌کارگیری روش FMEA به همراه نقشه‌شناختی فازی در این پژوهش است.

در پژوهشی دیگر، کاربرد روش PFMEA برای ارزیابی ریسک و اولویت‌بندی فرایندهای تولید قطعات خودرویی به‌همراه روش تحلیل پوششی داده‌های بازه‌ای و تحلیل روابط خاکستری بررسی شد [۷].

رویکرد ترکیبی FMEA و تحلیل پوششی داده‌ها همراه با توجه به مفهوم هزینه برای شناسایی و مدیریت خرابی‌های فرایند تولید سنگ در پژوهشی دیگر ارائه شد [۱].

در یکی از پژوهش‌ها، رویکرد بهبود با استفاده از روش‌های FMEA، گسترش عملکرد کیفیت و هزینه‌یابی مبتنی‌بر فعالیت در برنامه‌ریزی فرایند مفهومی ارائه شد [۸]. همچنین، برای به‌حداقل‌رساندن خطای بالقوه، رویکرد ترکیبی شامل FMEA و تئوری فازی برای مدیریت ریسک امنیت اطلاعات ارائه شد و در پروژه‌ی گروه پژوهشی دانشگاهی به‌کار رفت [۹].

روش تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن

روش FMEA، روش نظام‌یافته‌ای است که نواقص و خطاهای نهفته و آشکار در سیستم، فرایند، محصول و خدمت را شناسایی می‌کند و با تدابیر صحیح درصد حذف آن‌ها برمی‌آید. این روش بر جلوگیری از وقوع عیب و نقص، افزایش ایمنی و افزایش رضایت مشتری تمرکز دارد. به عبارت دیگر، FMEA با بهینه‌سازی فرایندها و محصولات سبب کاهش مبالغ زیادی از هزینه‌ها می‌شود. از بهترین ویژگی‌های FMEA اقدام کنشی به‌جای واکنشی در مقابل برخورد با شکست‌ها یا به عبارت دیگر، انجام عملی پیشگیرانه قبل از رویداد حادثه است نه بعد از آن.

روش PFMEA پرونده‌ای پویا و زنده، شامل تغییرات در فرایند طراحی تولید است و براساس متدولوژی ارائه‌شده در شکل ۱ اجرا می‌شود. در واقع، هر تغییر که بر فرایند تولید اثر می‌گذارد، بهتر است در مدارک PFMEA به‌روز

برای ترسیم نقشه‌شناختی فازی می‌توان از داده‌های سری زمانی و نظرات خبرگان استفاده کرد. در روش نقشه‌شناختی مبتنی بر محاسبه، از داده‌های سری زمانی به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود و منطق شبکه عصبی برای تخمین اوزان نقشه و روابط میان متغیرها کاربرد دارد. این دیدگاه را می‌توان به دو دسته اتوماتیک و شبه‌اتوماتیک تقسیم کرد. در شبه‌اتوماتیک که بیشتر اوقات کاربرد دارد، برای ترسیم نقشه‌شناختی فازی به برخی ورودی‌ها نیاز است که از دانش و تجربه فرد خبره در زمینه مورد مطالعه به‌دست می‌آید. براین اساس، مفاهیم و روابط علی و معلولی میان مفاهیم قابل‌ترسیم است. در نقشه‌شناختی، C_i ها گره‌ها یا مفاهیمی را نشان می‌دهند که با کمان‌های وزن‌دار به هم مرتبط هستند. وزن هر ارتباط میان دو مفهوم C_i و C_j برابر W_{ij} است که درجه علیت و نوع رابطه میان مفاهیم را نشان می‌دهد. به صورتی که $W_{ij} > 0$ بیانگر ارتباط علی-معلولی مثبت، $W_{ij} < 0$ ارتباط علی-معلولی منفی و $W_{ij} = 0$ ارتباط نداشتن دو مفهوم مورد بررسی است. در روش ترسیم نقشه‌شناختی، تخمین دقیق اوزان نقشه از سوی خبرگان مسئله‌ای ضروری است.

در سال‌های اخیر، از الگوریتم‌های یادگیری برای افزایش دقت اوزان، هم‌گرایی نقشه و کاهش وابستگی به نظر خبرگان استفاده شده است. این الگوریتم‌ها در سه گروه الگوریتم‌های یادگیری براساس هبیین^۸، الگوریتم‌های یادگیری براساس جمعیت و الگوریتم‌های ترکیبی دسته‌بندی می‌شوند [۱۹]. همچنین از الگوریتم هبیین و روش‌های فراابتکاری ترکیب شده‌اند و برای اصلاح وزن نقشه‌هایی که به‌صورت ترکیبی از داده‌های سری زمانی و نظرات خبرگان تشکیل می‌شوند مناسب هستند. در این پژوهش از میان الگوریتم‌های این دسته، الگوریتم یادگیری ترکیبی از هبیین غیرخطی و تکامل تفاضلی^۹ (NHL-DE) به‌کار گرفته شد؛ زیرا وزن‌های غیرصفر را در تکرارهای مختلف به‌روزرسانی، و روابط میان مفاهیم تعیین‌شده در نقشه اولیه را حفظ می‌کند. مراحل و گام‌های این الگوریتم در شکل ۲ ارائه شده است.

دلیل استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی، قدرتمند و سریع بودن آن برای جست‌وجو در مسائل بهینه‌سازی در

در PFMEA، مواردی مانند محصولات نامنطبق، شکایات مشتریان و غیره به‌عنوان ورودی برای تعیین خطاها در نظر گرفته می‌شود. PFMEA زمانی تهیه می‌شود که بیشترین اثر را روی طراحی محصول یا فرایند داشته باشد و باید تمام افرادی که در تهیه FMEA دخیل هستند آموزش‌های لازم را دیده باشند. در واقع، PFMEA مدرکی زنده در سازمان است و تمامی اقدامات صورت گرفته است و RPN های جدید مدنظر قرار می‌گیرد.

روش نقشه‌شناختی فازی

در دنیای واقعی، عوامل زیادی روابط پیچیده‌ای با سایر عوامل دارند؛ به‌طوری‌که از بیشتر آن‌ها تأثیر می‌پذیرند و بر بسیاری دیگر تأثیر می‌گذارند. از جمله روش‌هایی که برای نمایش این روابط وجود دارد، نقشه‌شناختی است. نقشه‌شناختی فازی روش مدل‌سازی برای سیستم‌های پیچیده تصمیم‌گیری است. در این روش، رفتار یک سیستم براساس مفاهیم آن توصیف می‌شود که در آن، هر مفهوم نمایانگر یک هویت، وضعیت، متغیر یا یک خصوصیت سیستم است. در واقع، نقشه‌شناختی نموداری برای بیان دیدگاه علت و معلولی یک فرد خبره درباره حوزه خاص طراحی می‌شود. سپس برای تجزیه و تحلیل تأثیرات سیاست‌ها یا تصمیمات مرتبط با تحقق اهداف خاص به‌کار می‌رود [۱۱]. روش نقشه‌شناختی فازی نقشه‌ای شناختی است که می‌تواند رابطه میان اجزای «چشم‌انداز ذهنی» را برای محاسبه «قدرت تأثیر» روابط علی معلولی با عددی در بازه ۰،۱ یا ۱،۰- استفاده کند [۱۲]. در واقع، در این روش هم‌زمان از تئوری‌های شبکه عصبی و منطق فازی استفاده می‌شود. نقشه‌های شناختی فازی در شبیه‌سازی، مدل‌سازی راهبردهای سازمانی، حمایت از تدوین مسائل راهبردی و تجزیه و تحلیل تصمیمات، ایجاد پایگاه‌های دانش، تشخیص مسائل مدیریتی و... به‌کار برده می‌شوند [۱۳]. از کاربردهای جدید این روش در سال‌های اخیر می‌توان به برنامه‌ریزی بازاریابی راهبردی برای شرکت‌های صنعتی [۱۴] برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر [۱۵]، ارزیابی یکپارچه زیست‌محیطی [۱۶]، شناسایی و ارزیابی ریسک‌های فرودگاه [۱۷] و ارزیابی خرابی‌های فرایندهای تولیدی [۱۸] اشاره کرد.

ماتریس وزنی نهایی میان متغیرها در مرحله اول و sgn بیانگر تابع علامت هستند. باید توجه داشت تابع تبدیل (f) مدنظر در الگوریتم یادگیری در این پژوهش، سیگموئید یعنی $\frac{1}{1+e^{-\lambda x}}$ است که تنها از یک پارامتر λ استفاده می‌کند که با توجه به تکرارهای مختلف، مقدار λ برابر ۱ تعیین شده است. شرایط خاتمه الگوریتم نیز عبارت است از:

الف) حالتی پایدار، ب) رسیدن به رفتاری آشوب‌ناک از سیستم، ج) رسیدن به تعداد تکرار مورد نظر در بازه زمانی خاص [۲۰].

فضاهای پیوسته است. در واقع، الگوریتم تکاملی تفاضلی برای غلبه بر نقص اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی جست‌وجونکردن محلی در این الگوریتم ارائه شده است. داشتن حافظه‌ای برای حفظ اطلاعات جواب‌های مناسب در جمعیت فعلی، از مزایای این الگوریتم است.

در شبه کد ارائه‌شده، A^0 بیانگر ماتریس حالت اولیه سیستم، W^0 بیانگر ماتریس وزنی اولیه میان متغیرها، $A^{(k)}$ و $A^{(k+1)}$ بیانگر مقادیر جدید متغیرها در تکرار k و $k+1$ و η و γ بیانگر اعدادی مثبت و بسیار کوچک (نرخ یادگیری)، $W_{ji}^{(k)}$ و $W_{ji}^{(k-1)}$ بیانگر مقادیر به‌روزشده اوزان میان متغیرهای i و j در تکرار k و $k-1$ ، $W_{NHL}^{(k+1)}$ بیانگر

مرحله اول: الگوریتم یادگیری هبیین غیرخطی

گام ۱: دریافت وضعیت مفهوم ورودی A^0 و ماتریس وزنی اولیه W^0 ،
 گام ۲: برای هر تکرار (k) گام‌های ۳ الی ۵ را انجام بدهید:

گام ۳: محاسبه $A^{(k)}$ با توجه به رابطه $A_i^{(k+1)} = f \left(A_i^{(k)} + \sum_{j=1}^N A_j^{(k)} W_{ji}^{(k)} \right)$

گام ۴: به روز رسانی اوزان با توجه به رابطه ذیل:

$$W_{ji}^{(k)} = \gamma W_{ji}^{(k-1)} + \eta A_i^{(k-1)} \left(A_j^{(k-1)} - \text{sgn}(W_{ji}^{(k+1)}) A_i^{(k-1)} \right)$$

گام ۵: ادامه دادن تا زمانی که شرایط خاتمه دهنده برآورده شوند (با در نظر گرفتن دو شرط برای اتمام الگوریتم).
 گام ۶: ارسال وزن نهایی $W_{NHL}^{(k+1)}$ به مرحله دوم.

مرحله دوم: الگوریتم تکامل تفاضلی

گام ۱: مقداردهی اولیه جمعیت الگوریتم تکامل تفاضلی در همسایگی $W_{NHL}^{(k+1)}$ و در درون محدودیت‌های وزنی پیشنهادی،
 گام ۲: تکرار برای هر حالت مفهوم ورودی (k)،
 گام ۳: به ازای هر جمعیت گام‌های ۴ الی ۶ را تکرار کنید:
 گام ۴: جهش 1 ($W_i^{(k)}$) بردار جهش یافته \leftarrow
 گام ۵: ترکیب 2 (بردار جهش یافته) \leftarrow بردار آزمایشی 4 ،
 گام ۶: اگر (بردار آزمایشی) F کوچکتر یا مساوی $F(W_i^{(k)})$ باشد، بردار آزمایشی برای نسل بعدی پذیرفته است.
 گام ۷: ادامه دادن تا زمانی که شرط خاتمه برآورده شود.

شکل ۲. شبه کد الگوریتم یادگیری ترکیبی NHL-DE [۲۱]

به‌کار گرفتند. خروجی این گام، شناسایی خطاهای سیستم به همراه رتبه آن‌ها در سه معیار شدت، احتمال وقوع و تشخیص است.

در حال حاضر، با توجه به مقدار سه معیار مذکور می‌توان RPN را برای هر خطا محاسبه کرد، اما شاخص مذکور، تلاش‌های بهبود را روی حالت خطا متمرکز می‌کند که ممکن است با داشتن RPN بالاتر، وخامت

رویکرد پیشنهادی

در این پژوهش برای اولویت‌بندی واقعی خطاها، رویکرد جدیدی ارائه شد که علاوه بر در نظر گرفتن سه معیار شدت خطا، احتمال وقوع و تشخیص آن، روابط درونی موجود میان خطاهای سیستم را نیز مدنظر قرار داد. در گام ابتدایی از رویکرد پیشنهادی، تیم چندتخصصی تشکیل شده برای این موضوع، روش FMEA/PFMEA را

وزنی و تنها سناریوی مذکور انجام می‌شود. در این پژوهش، الگوریتم یادگیری ترکیبی از هبیین غیرخطی و تکامل تفاضلی به‌کار گرفته شد که گام‌های آن در شکل ۲ آمده است. پس از اتمام محاسبات نقشه‌شناختی و دستیابی به ساختار پایدار سیستم، امتیازی به ازای هر خطا به‌دست آمد که ملاک اولویت‌بندی خطاهاست. در ادامه، در مطالعه‌ای موردی از صنعت قطعات خودرویی، خطاها براساس رویکرد ترکیبی FMEA-FCM اولویت‌بندی، و نتایج آن ارائه شد.

تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش، روش پیشنهادی اولویت‌بندی ریسک در یکی از شرکت‌های تأمین‌کننده قطعات خودرو کشور اجرا شد. این مطالعه بر روی سه فرایند بحرانی و دو قطعه مهم شرکت انجام شد که در ادامه، نحوه انتخاب این فرایندها و قطعات بررسی می‌شود.

تولید قطعات در شرکت مورد مطالعه از ۱۲ فرایند شامل ماسه‌سازی، ماهیچه‌گیری، ذوب‌سازی، قالب‌گیری، ذوب‌ریزی، برش‌کاری، شات‌بلاست، شات‌پین، سنگ‌زنی، تریم، شات‌پین و تست تشکیل شده است. از اهداف راهبردی این شرکت - که قصد دارد در سال جاری و آینده به آن دست یابد - کاهش میزان ضایعات داخلی شرکت از ۸ درصد به ۴ درصد است که بر مهم‌ترین هدف شرکت یعنی رضایت مشتری اثر زیادی دارد؛ بنابراین، در این پژوهش وضعیت شرکت از نظر میزان ضایعات داخلی قطعات و تعداد برگشتی‌های قطعات بررسی شد. در ابتدا، برای درک بیشتر از فراوانی رخداد عیوب در کل قطعات و مشاهده تعداد عیوب به تفکیک نوع و عامل ایجاد آن‌ها در طول یک سال، شکل ۳ تحلیل شد که براساس آن، بیشترین عیوب به عوامل ماسه‌ریزی و کشیدگی مربوط است. همچنین برای درک عمیق‌تر موضوع، بررسی نمودار پارتوی عیوب (شکل ۴) صورت گرفت. با توجه به شکل ۴، عیوب ماسه‌ریزی و کشیدگی بیشترین تعداد و حدود ۴۷ درصد از کل عیوب را تشکیل می‌دهند.

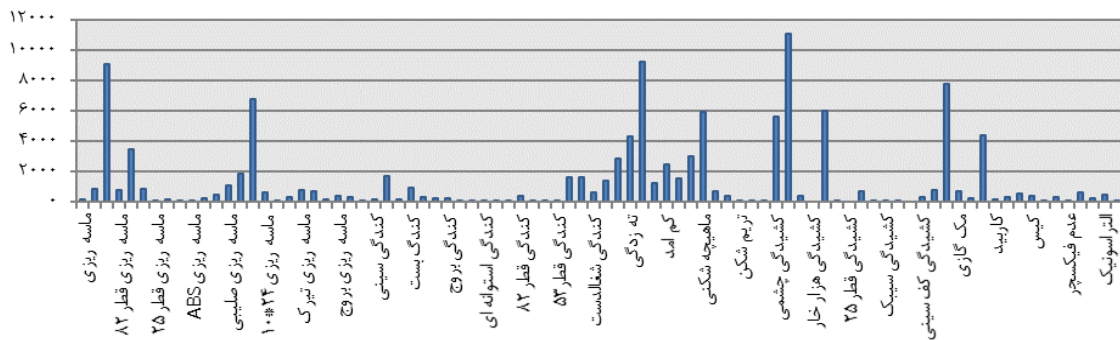
با توجه به اینکه رضایت مشتری یکی از عوامل مهم و راهبردی شرکت به‌شمار می‌آید، نیاز است موضوع از دیدگاه او، و ورودی‌های او از سوی تأمین‌کننده (شرکت مورد بررسی) بیشتر بررسی شود. با توجه به شکل ۵،

کمتری از سایر خطاهایی داشته باشد که RPN پایین‌تری دارند. همچنین در واقعیت، برخی خطاهای سیستم از خطاهای دیگر اثر می‌پذیرد یا بر آن‌ها اثر می‌گذارد؛ بنابراین، در این پژوهش جایگزینی شاخص متناسب با RPN در شرایط مذکور صورت گرفت. برای اینکه شاخص جدید، توانایی در نظر گرفتن روابط درونی خطاها را داشته باشد، روش نقشه‌شناختی فازی برای نمایش روابط علی و معلولی به‌کار رفت؛ به صورتی که تمامی خطاها (در یک فرایند یا کل سیستم) به‌عنوان مفاهیم نقشه‌شناختی در نظر گرفته شد. همچنین این خطاها را یال‌هایی به یکدیگر متصل کرد که نشانگر روابط میان خطاهاست. در این روابط مطابق با توضیحات روش نقشه‌شناختی، نیاز است تا خبرگان وزن‌دهی کنند که این کار را تیم به‌کار گرفته‌شده در تهیه PFMEA انجام داد. پس از این، برای اعمال کردن معیارهای سه‌گانه حاصل از PFMEA برای هر خطا، هریک از معیارها به‌عنوان مفهومی اختصاصی برای هر خطا در نظر گرفته شد. به‌عنوان مثال، خطای اول موجود در نقشه‌شناختی علاوه بر ارتباط احتمالی با سایر خطاها، با سه معیار شدت، احتمال وقوع و تشخیص، روابطی با میزان وزن قطعی ۱ خواهد داشت. این عمل اثرگذاری معیارهای سه‌گانه را به مفهوم خطا منتقل می‌کند و بر خطای مورد بررسی اعمال می‌شود. همچنین برای محاسبه امتیاز حاصل از نقشه‌شناختی برای اولویت‌بندی خطاها، مفهوم اختصاصی تحت عنوان امتیاز با رابطه‌ای مستقیم و با میزان وزن قطعی ۱ به خطای مورد بررسی متصل شد.

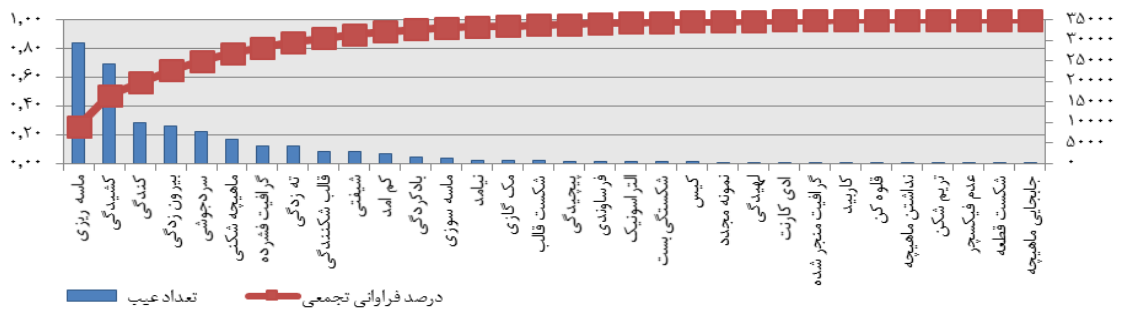
با توجه به توضیحات، نقشه‌شناختی فازی ترسیم شد که نمونه‌ای از آن در بخش بعد ارائه می‌شود. در ادامه، برای دستیابی به امتیاز هر خطا (شاخصی برای اولویت‌بندی خطاها) به سناریوسازی و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری نیاز است. در واقع سناریوی مورد بررسی، با مقداردهی میزان معیارهای سه‌گانه به ازای هر خطا ساخته می‌شود. منظور از مقداردهی، قراردادن میزان معیارهای شدت، احتمال وقوع و تشخیص در مفاهیم اختصاص داده‌شده به این معیارها برای هر خطا به‌صورت نرمال‌شده است. در ادامه با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری، محاسبات نقشه‌شناختی با توجه به ماتریس

با بررسی دو نمودار پارتوی ارائه‌شده برای قطعات بازویی اتاق چپ و بازویی چرخ راست خودرو ۴۰۵ (شکل‌های ۶ و ۷) ماسه‌ریزی و کشیدگی دو عامل مهم و اساسی برگشت این قطعات هستند. همچنین با توجه به شکل‌های ۳، ۴، ۶ و ۷ مشاهده می‌شود برطرف کردن عوامل ریشه‌ای این دو عیب مهم، کاهش چشمگیر ضایعات داخلی شرکت، و افزایش رضایت مشتری را به دنبال داشته است.

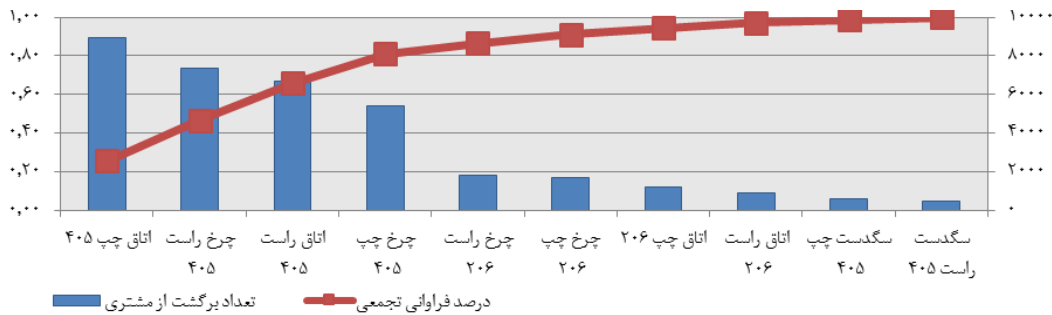
حدود ۴۶ درصد برگشت از مشتری به قطعات بازویی اتاق چپ و بازویی چرخ راست خودرو ۴۰۵ مربوط است. با توجه به این مسئله، برطرف کردن عیوب در این دو قطعه رضایت بیشتر مشتری و کاهش ضایعات داخلی شرکت را در پی خواهد داشت؛ از این رو در ادامه نوع عیوبی که مشتری در قطعات ورودی خود مشاهده، و آن‌ها را در طول یک سال بازگردانی کرده است بررسی می‌شود.



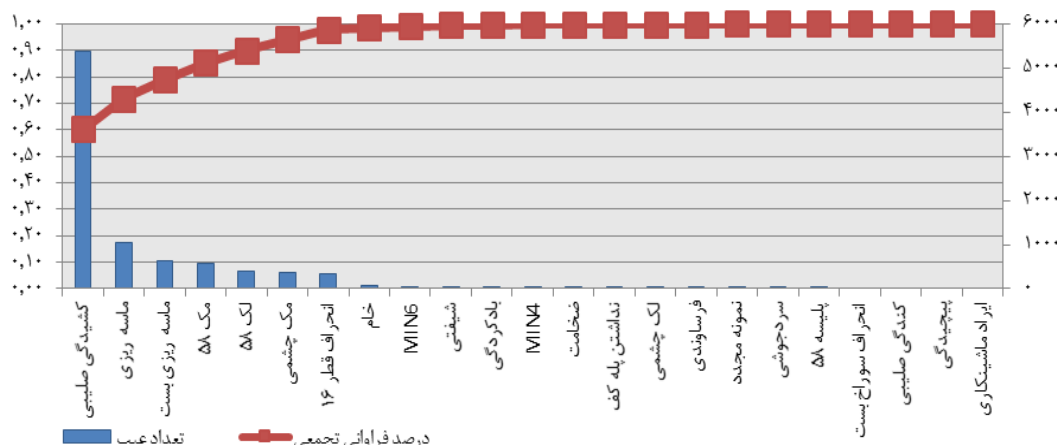
شکل ۳. تعداد عیوب در یک سال به تفکیک نوع عیب



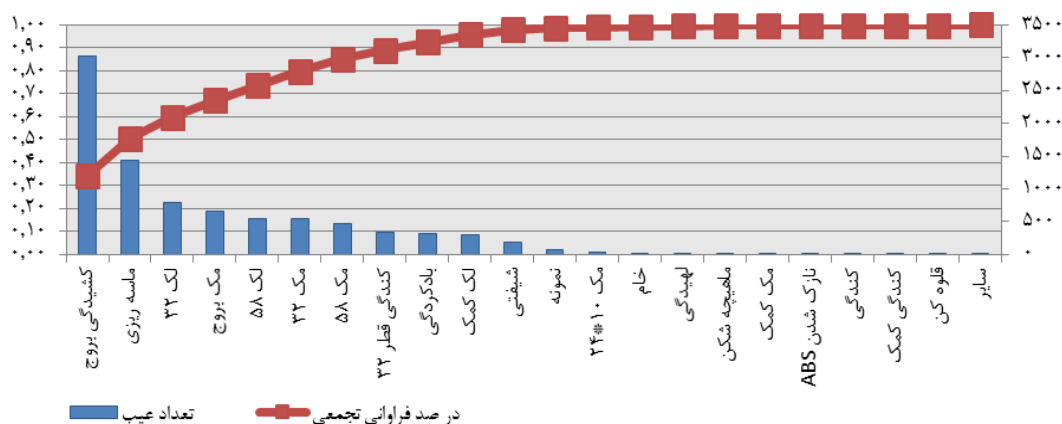
شکل ۴. نمودار پارتوی عیوب



شکل ۵. برگشتی‌های مشتری به تفکیک قطعه



شکل ۶. عوامل و عیوب برگشت از مشتری قطعه بازویی اتاق چپ خودرو ۴۰۵



شکل ۷. عوامل و عیوب برگشت از مشتری قطعه بازویی چرخ راست خودرو ۴۰۵

به فرایند ذوب‌سازی و ذوب‌ریزی می‌تواند تا حد زیادی به مرتفع‌شدن عیب کشیدگی کمک کند.

همچنین، عیب ماسه‌ریزی همان برجستگی‌های حجیم و بی‌قاعده با ظاهری شکسته در سطوح افقی و گوشه‌های قطعه ریختگی است که به‌طور معمول در قسمت فوقانی قطعه، جایی که از ذوب پر شده است دیده می‌شود. همچنین در قسمت تحتانی قطعه، کمبود مواد به‌صورت پراکنده (در اثر ریزش ماسه از تای رویی درون تای زیری) وجود دارد. براساس نظر خبرگان و واحد مهندسی، بالابودن خاک کل ماسه، پایین‌بودن خاک فعال ماسه، کم‌بودن زمان مخلوط‌کردن ماسه، رطوبت پایین ماسه، دمای بالای ماسه قالب‌گیری و... از عوامل ایجاد این عیب است که عمده این‌ها با فرایند ماسه‌سازی ارتباط دارد. با توجه به موارد ذکرشده، اگر به قطعات مذکور و فرایندهای ماسه‌سازی، ذوب‌سازی و ذوب‌ریزی توجه

اکنون مهم‌ترین عوامل ایجاد عیوب کشیدگی و ماسه‌ریزی براساس نظرات خبرگان و واحد مهندسی بررسی می‌شود تا دلایل انتخاب‌کردن برخی فرایندهای تولید مشخص شود.

عیب کشیدگی همان حفره‌هایی است که در مناطق نزدیک گلویی تغذیه یا درون قطعات در مناطق گرم قطعه ایجاد می‌شود. این حفره‌ها ممکن است پس از ماشین‌کاری مشخص شود و قطعات را برگشت دهد. عوامل ایجاد این عیب عبارت است از: نگه‌داشتن ذوب در کوره به مدت طولانی، دمای بیش‌ازحد بالا و پایین ذوب‌ریزی، بالابودن بیش‌ازحد درصد سیلیسیم در مذاب، وجود عنصر آلومینیوم بیش‌ازحد در ذوب، زیادبودن یا کم‌بودن مقدار جوانه‌زا و نمونه‌گیری نادرست از ذوب کوره. با توجه به موارد فوق مشخص می‌شود مهم‌ترین عوامل به فرایند ذوب مربوط است و توجه بیشتر و اساسی

ازای قطعه چرخ راست خودرو ۴۰۵ هستند و اولین اولویت رسیدگی را براساس شاخص RPN دارند.

همان‌طور که بیان شد، به دلیل اینکه شاخص عدد اولویت ریسک با مشکلاتی مانند در نظر نگرفتن روابط درونی میان خطاها مواجه است، به شاخص جدیدی برای اولویت‌بندی خطاها نیاز داریم که میزان آن در جدول ۲ به ازای هر قطعه و فرایند ارائه شده است. براساس این جدول، «میزان افزودن آب به میکسر» با امتیاز ۰/۷۹۲۲ در فرایند ماسه‌سازی، «عدم تصفیه ذوب از پاتیل سرباره» با امتیاز ۰/۸۰۱۷ در فرایند ذوب‌سازی و «دمای پایین ذوب» با امتیاز ۰/۷۶۳۲ در فرایند ذوب‌ریزی، بالاترین اولویت رسیدگی را در تولید قطعه اتاق چپ خودرو ۴۰۵ دارند. «میزان درصد خاک ماسه»، «سرباره‌گیری نامناسب» و «یکنواخت‌نبودن در ذوب‌ریزی» مهم‌ترین خطاهای موجود در فرایندهای سه‌گانه مورد بررسی در تولید قطعه چرخ راست خودرو ۴۰۵ است.

به‌طور کلی، با مقایسه نتایج حاصل از دو شاخص مورد استفاده در این پژوهش و نظرات کارشناسان مشخص شد اولویت‌بندی ناشی از روش دوم به واقعیت نزدیک‌تر است؛ زیرا عدد اولویت ریسک ممکن است به دلیل بالا بودن وخامت آن نباشد. همچنین موجب قرارگرفتن یک خطا به صورت کاذب در اولویت‌های بالا شود و در نتیجه مدیریت شرکت را گمراه کند. افزون‌براین، در صورتی که معیارهای سه‌گانه اختصاص داده شده برای هر خطا به صورت اغراق‌آمیزی زیاد باشد، سازمان با مجموعه‌ای از خطاها روبه‌رو می‌شود که به صورت کاذب اولویت بالایی دارند. اصلاح این مجموعه خطاها، هزینه‌های زیادی را به سازمان وارد می‌کند و موجب می‌شود تمایل مدیریت در انجام‌دادن اقدامات اصلاحی کاهش یابد. از سوی دیگر، زمانی که روابط میان خطاها در نظر گرفته می‌شود، خطاهای دارای RPN بالا و اثرگذاری بیشتر بر سایر خطاها در اولویت قرار می‌گیرد. این توضیحات نشانگر آن است که در نظر داشتن RPN و روابط درونی خطاها به‌طور هم‌زمان ممکن است نتایج واقع‌بینانه‌تری را در اختیار مدیریت قرار دهد.

بیشتری شود، ضایعات داخلی به‌شدت کم، و رضایت مشتری بیشتر می‌شود. برای اجرایی کردن این امر، ضروری است که مدیریت بر خطاها یا همان عوامل احتمالی ریسک ایجادکننده این عیوب که از روش PFMEA به‌دست آمده است، تمرکز کند. برای بررسی بیشتر، فهرست مهم‌ترین خطاهای شناسایی شده به ازای سه فرایند و دو قطعه منتخب به همراه معیارهای سه‌گانه تعیین‌کننده RPN در جدول ۱ ارائه شده است.

برای استفاده از روش پیشنهادی، نقشه‌شناختی با توجه به توضیحات بخش مربوط، به صورت جداگانه برای فرایندهای منتخب ترسیم می‌شود که روابط درونی میان خطاها را در هر فرایند نمایش می‌دهند. برای نمونه، نقشه‌شناختی مربوط به فرایند ذوب‌ریزی در شکل ۸ نشان داده شده است.

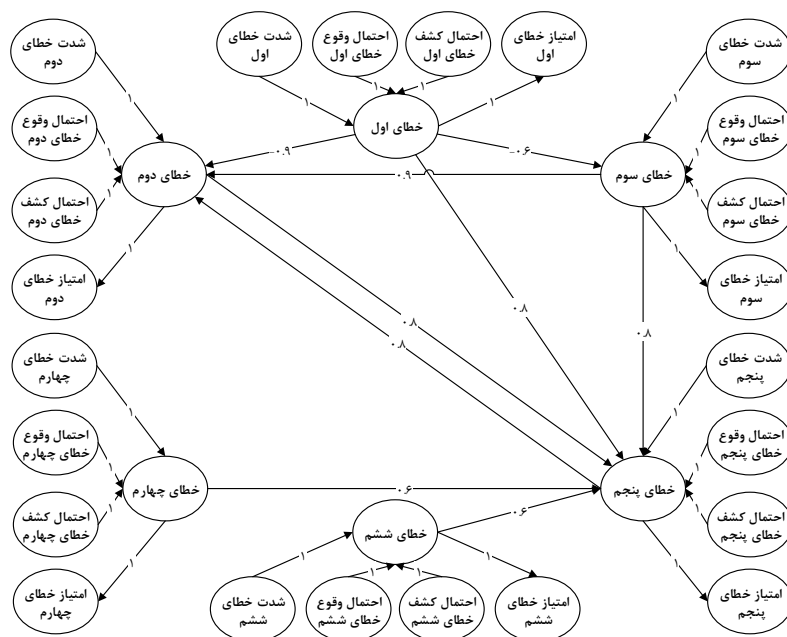
در ادامه، برای دستیابی به امتیاز اولویت‌بندی خطاها، سناریوسازی مطابق با میزان معیارهای سه‌گانه تعیین‌کننده عدد اولویت ریسک انجام می‌شود. از آنجا که در این پژوهش، دو قطعه در فرایندهای ماسه‌سازی، ذوب‌سازی و ذوب‌ریزی بررسی شدند، به دو سناریو (خطاهای هر قطعه) در هر فرایند نیاز بود. مقادیر مفاهیم موجود در این سناریوها همان اعداد موجود در جدول ۱ است که پس از نرمال‌سازی در محاسبات نقشه‌شناختی از آن استفاده شد. با توجه به دو سناریوی موجود به ازای هر فرایند، الگوریتم یادگیری ترکیبی اجرا، و امتیازهای اولویت خطاهای موجود در هر فرایند به ازای هر قطعه در جدول ۲ ارائه شد. با بررسی اولویت‌بندی خطاها براساس شاخص سنتی RPN در جدول ۲ نتیجه گرفتیم که «درصد خاک رس فعال/ بنتونیت» در فرایند ماسه‌سازی، «محاسبه نادرست ذوب‌سازی» در فرایند ذوب‌سازی و «دمای پایین ذوب» و «رعایت‌نکردن زمان میرایی نشکن‌ساز» در فرایند ذوب‌ریزی، مهم‌ترین خطاها در شرکت مورد بررسی به ازای قطعه بازویی اتاق چپ خودرو ۴۰۵ هستند و اولین اولویت رسیدگی را دارند. همچنین «زمان میکس» در فرایند ماسه‌سازی، «فعال‌سازی مواد نشکن‌ساز» در فرایند ذوب‌سازی و «خطای پیرومتری» و «رعایت‌نکردن زمان میرایی نشکن‌ساز» در فرایند ذوب‌ریزی، مهم‌ترین خطاها در شرکت مورد بررسی به

جدول ۱. فهرست خطاهای موجود در فرایندهای منتخب تولید به ازای قطعات مورد بررسی

نام فرایند	شماره خطا	نام خطا	بازویی اتاق چپ خودرو ۴۰۵			چرخ راست خودرو ۴۰۵		
			شدت وقوع	احتمال وقوع	احتمال تشخیص	شدت وقوع	احتمال وقوع	احتمال تشخیص
ماسه‌سازی	۱	درصد خاک رس فعال / بنتونیت	۸	۴	۳	۷	۴	۲
	۲	رطوبت ماسه	۷	۳	۴	۷	۳	۳
	۳	زمان میکس	۸	۲	۴	۷	۳	۴
	۴	میزان افزودن آب به میکسر	۹	۲	۲	۶	۴	۳
	۵	میزان ماسه نو	۷	۲	۴	۹	۳	۲
	۶	میزان درصد خاک ماسه	۸	۲	۲	۷	۴	۲
	۷	میزان دمای ماسه کهنه	۷	۲	۲	۶	۲	۲
	۸	میزان افزودن پودر زغال	۴	۳	۴	۴	۳	۲
دوب‌سازی	۱	میزان فروسیلیکو منیزیم	۹	۲	۲	۷	۲	۲
	۲	نوع درپوش پاتیل نشکن‌ساز	۱۰	۳	۳	۹	۲	۴
	۳	فعال‌سازی مواد نشکن‌ساز	۱۰	۲	۳	۱۰	۳	۳
	۴	تصفیه‌نکردن ذوب از پاتیل سرباره	۸	۲	۲	۷	۲	۲
	۵	خطا هنگام کنترل درجه حرارت ذوب	۸	۲	۳	۷	۴	۲
	۶	محاسبه نادرست ذوب‌سازی	۹	۴	۳	۹	۲	۲
	۷	خطای نمونه‌گیری	۱۰	۳	۲	۸	۳	۳
	۸	سرباره‌گیری نامناسب	۷	۴	۳	۸	۲	۴
	۹	میزان جوانه‌زا	۷	۳	۳	۸	۳	۲
	۱۰	رعایت‌نشدن روش صحیح جوانه‌زنی	۱۰	۳	۲	۸	۲	۲
	۱۱	بالارفتن دمای تلقیح جوانه‌زا	۱۰	۳	۳	۹	۴	۲
دوب‌ریزی	۱	سرعت پایین ذوب‌ریزی	۱۰	۲	۲	۶	۳	۲
	۲	دمای پایین ذوب	۱۰	۲	۳	۷	۲	۳
	۳	نبود یکنواختی در ذوب‌ریزی	۷	۳	۲	۸	۳	۲
	۴	خطای پیرومتری	۸	۲	۲	۱۰	۲	۳
	۵	رعایت‌نکردن زمان میرایی نشکن‌ساز	۱۰	۲	۳	۱۰	۲	۳
	۶	مشخص‌نبودن تفکیک پاتیل‌ها	۱۰	۲	۲	۹	۳	۲

جدول ۲. نتایج حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با عدد اولویت ریسک

نام فرایند	شماره خطا	بازویی اتاق چپ خودرو ۴۰۵				چرخ راست خودرو ۴۰۵			
		عدد اولویت ریسک	اولویت‌بندی سنتی	امتیاز روش پیشنهادی	اولویت‌بندی جدید	عدد اولویت ریسک	اولویت‌بندی سنتی	امتیاز روش پیشنهادی	اولویت‌بندی جدید
ماشین‌سازی	۱	۹۶	۱	۰/۷۶۹۶	۳	۵۶	۰/۷۶۰۹	۳	
	۲	۸۴	۲	۰/۷۱۴۰	۶	۶۲	۰/۴۷۹۵	۶	
	۳	۶۴	۳	۰/۷۵۵۲	۴	۸۴	۰/۶۶۲۱	۵	
	۴	۳۶	۶	۰/۷۹۲۲	۱	۷۲	۰/۴۷۴۹	۷	
	۵	۵۶	۴	۰/۵۱۸۵	۸	۵۴	۰/۷۶۰۹	۳	
	۶	۳۲	۷	۰/۷۷۳۰	۲	۵۶	۰/۷۸۶۱	۱	
	۷	۲۸	۸	۰/۷۱۹۹	۵	۲۴	۰/۷۶۲۲	۲	
	۸	۴۸	۵	۰/۶۹۶۲	۷	۲۴	۰/۷۳۳۵	۴	
	۱	۳۶	۷	۰/۵۰۳۱	۱۱	۲۸	۰/۷۴۷۱	۷	
	۲	۹۰	۲	۰/۷۵۰۶	۸	۷۲	۰/۷۴۶۷	۸	
	۳	۶۰	۵	۰/۷۸۳۸	۴	۹۰	۰/۷۸۷۹	۳	
ذوب‌سازی	۴	۳۲	۸	۰/۸۰۱۷	۱	۲۸	۰/۷۵۲۰	۶	
	۵	۴۸	۶	۰/۷۵۵۲	۷	۵۶	۰/۷۳۷۸	۱۰	
	۶	۱۰۸	۱	۰/۷۹۶۴	۲	۳۶	۰/۷۴۳۸	۹	
	۷	۶۰	۵	۰/۶۸۳۴	۱۰	۷۲	۰/۷۵۹۱	۴	
	۸	۸۴	۳	۰/۷۰۱۰	۹	۶۴	۰/۸۰۲۳	۱	
	۹	۶۳	۴	۰/۷۸۰۱	۵	۴۸	۰/۷۵۲۶	۵	
	۱۰	۶۰	۵	۰/۷۷۵۶	۶	۳۲	۰/۵۱۰۰	۱۱	
	۱۱	۹۰	۲	۰/۷۸۷۰	۳	۷۲	۰/۷۸۸۱	۲	
	۱	۴۰	۳	۰/۷۵۳۶	۳	۳۶	۰/۴۹۵۱	۶	
	۲	۶۰	۱	۰/۷۶۳۲	۱	۴۲	۰/۷۳۷۴	۲	
	۳	۴۲	۲	۰/۷۳۷۰	۴	۴۸	۰/۷۵۲۱	۱	
ذوب‌ریزی	۴	۳۲	۴	۰/۷۵۷۷	۲	۶۰	۰/۷۱۵۷	۴	
	۵	۶۰	۱	۰/۵۰۸۴	۶	۶۰	۰/۷۱۰۹	۵	
	۶	۴۰	۳	۰/۵۷۰۷	۵	۵۴	۰/۷۳۲۱	۳	



شکل ۸. نقشه‌شناختی فازی خطاهای موجود در فرایند ذوب‌ریزی

نتیجه‌گیری

دستیابی به نتایج واقعی‌تر مدنظر قرار گرفت. همچنین با استفاده از الگوریتم یادگیری ترکیبی از هبیین غیرخطی و تکامل تفاضلی، خطاهای موجود در فرایندهای منتخب، به ازای قطعات مورد نظر براساس روش FMEA-FCM دوباره اولویت‌بندی شد. با مقایسه نتایج حاصل از دو روش مورد استفاده در این پژوهش و نظرات کارشناسان مشخص شد اولویت‌بندی ناشی از روش دوم و درنظرگرفتن روابط درونی میان خطاها به واقعیت نزدیک‌تر است. استفاده از مشتریان قطعات در تیم FMEA در دوره‌های آتی و درنظرگرفتن روابط میان تمامی فرایندهای تولید و به بیان دیگر، مدنظر قراردادن روابط میان خطاهای هر فرایند با سایر فرایندهای تولیدی به ازای قطعات مختلف از پیشنهادهای توسعه این پژوهش برای بررسی یکپارچه و کارآمد ساختار تولیدی است.

با توجه به پیچیدگی‌های صنعت خودروسازی و ارتباط آن با عوامل انسانی، به تکنیک‌هایی برای برنامه‌ریزی و حفظ قابلیت اطمینان فرایندهای ساخت و تولید نیاز است. یکی از این تکنیک‌ها روش PFMEA است که به‌طور گسترده در بیشتر صنایع مهم دنیا استفاده می‌شود. در این پژوهش به تدوین PFMEA توسط تیم مهندسی در شرکت مورد مطالعه برای قطعات خودروبی پرداخته شد. سپس به‌جای استفاده از شاخص سنتی RPN در محاسبه میزان ریسک هر فرایند به ازای هر قطعه، ترکیب آن با روش نقشه‌شناختی فازی به‌کار رفت. به نحوی که در ابتدا، ارزیابی و اولویت‌بندی خطاها با استفاده از شاخص RPN انجام شد. سپس با توجه به اینکه این شاخص معایبی دارد، روابط هر خطا با سایر خطاها برای

منابع

1. Rezaee, M. J., Salimi, A., and Yousefi, S. (2017). "Identifying and Managing Failures in Stone Processing Industry Using Costbased FMEA", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 9-12, PP. 3329-3342.
2. Nggada, S. H. (2012). "Software Failure Analysis at Architecture Level Using FMEA", *International Journal of Software Engineering and its Applications*, Vol. 6, No. 1, PP. 61-74.
3. Trafialek, J., and Kolanowski, W. (2014). "Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for Audit of HACCP System", *Food Control*, Vol. 44, PP. 35-44.
4. Papadopoulos, Y., Parker, D., and Gran, C. (2004). "Automating the Failure Modes and Effects Analysis of Safety Critical Systems", *Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering, (HASE)*, IEEE Computer Society Press, PP. 310-311.
5. Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., and Bagheri, M. (2018). "HSE Risk Prioritization Using Robust DEA-FMEA Approach with Undesirable Outputs: A Study of Automotive Parts Industry in Iran", *Safety Science*, Vol. 102, PP. 144-158.
6. ArabianHoseynabadi, H., Oraee, H., and Tavner, P. J. (2010). "Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Wind Turbines", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, No. 7, PP. 817-824.
7. Bagheri, M., Yousefi, S., and Rezaee, M. J. (2016). "Risk Measurement and Prioritization of Auto Parts Manufacturing Processes Based on Process Failure Analysis, Interval Data Envelopment Analysis and Grey Relational Analysis", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Doi: 10. 1007/S10845-016-1214-1.
8. Hassan, A., Siadat, A., Dantan, J. Y., and Martin, P. (2010). "Conceptual Process Planning—an Improvement Approach Using QFD, FMEA, and ABC Methods", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 4, PP. 392-401.
9. Silva, M. M., De Gusmão, A. P. H., Poleto, T., E Silva, L. C. and Costa, A. P. C. S. (2014). "A Multidimensional Approach to Information Security Risk Management Using FMEA and Fuzzy Theory", *International Journal of Information Management*, Vol. 34, No. 6, PP. 733-740.
10. Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon, G. K. K., and Yang, J. B. (2009). "Failure Mode and Effects Analysis by Data Envelopment Analysis", *Decision Support Systems*, Vol. 48, No. 1, PP. 246-256.
11. Asher, H. B. (1983). "Causal Modeling". 2nd Ed. Newbury Park, CA: Sage Publications.
12. Kosko, B. (1986). "Fuzzy Cognitive Maps", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 24, No. 1, PP. 65-75.

13. RodriguezRepiso, L., Setchi, R., and Salmeron, J. L. (2007). "Modelling IT Projects Success with Fuzzy Cognitive Maps", *Expert Systems with Applications*, Vol. 32, No. 2, PP. 543-559.
14. Lee, K. C., Lee, H., Lee, N. and Lim, J. (2013). "An Agent-Based Fuzzy Cognitive Map Approach to the Strategic Marketing Planning for Industrial Firms", *Industrial Marketing Management*, Vol. 42, No. 4, PP. 552-563.
15. Kyriakarakos, G., Patlitzianas, K., Damasiotis, M., and Papastefanakis, D. (2014). "A Fuzzy Cognitive Maps Decision Support System for Renewables Local Planning", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, PP. 209-222.
16. Mourhir, A., Rachidi, T., Papageorgiou, E. I., Karim, M., and Alaoui, F. S. (2016). "A Cognitive Map Framework to Support Integrated Environmental Assessment", *Environmental Modelling and Software*, Vol. 77, PP. 81-94.
17. Rezaee, M. J. and Yousefi, S. (2017). "An Intelligent Decision Making Approach for Identifying and Analyzing Airport Risks", *Journal of Air Transport Management*, Doi: 10.1016/J.Jairtraman. 2017. 06. 013.
18. Rezaee, M. J., Yousefi, S., and Babaei, M. (2017). "Multi-stage Cognitive Map for Failures Assessment of Production Processes: An Extension in Structure and Algorithm", *Neurocomputing*, Vol. 232, PP. 69-82.
19. Papageorgiou, E. I., and Kannappan, A. (2012). "Fuzzy Cognitive Map Ensemble Learning Paradigm to Solve Classification Problems: Application to Autism Identification", *Applied Soft Computing*, Vol. 12, No. 12, PP. 3798-3809.
20. Papageorgiou, E. I., Stylios, C., and Groumpos, P. P. (2006). "Unsupervised Learning Techniques for FineTuning Fuzzy Cognitive Map Causal Links", *International Journal of HumanComputer Studies*, Vol. 64, No. 8, PP. 727-743.
21. Papageorgiou, E. I., and Salmeron, J. L. (2014). "Methods and Algorithms for Fuzzy Cognitive Map-Based Modeling", *In Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, PP. 1-28.

واژگان انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Failure Mode and Effects Analysis
2. Process Failure Mode and Effects Analysis
3. Severity
4. Occurrence
5. Detection
6. Risk Priority Number
7. Fuzzy Cognitive Map
8. Hebbian
9. Nonlinear Hebbian-Differential Evolution