هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

تحلیل خطای سامانه‌ی کنترل با عملگر سروو در موتور سوخت مایع با تراست متغیر

مهدی خرسندی[۱]، علی جعفرقلی[۲] و حمیدرضا علی محمدی[۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، امیرکبیر، تهران، ایران، m.khorsandi@aut.ac.ir

۲- دکتری، خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، alijgh@yahoo.com

۳- دکتری، پژوهشگاه هوافضا ، تهران، ایران، hataf1353@gmail.com

چکیده

استفاده از سامانه های کنترلی با عملگر سروو یکی از روش های متداول تغییر تراست در موتورهای سوخت مایع می باشد. هدف از انجام تحلیل خطای فرایند، شناسایی حالت های بالقوه خرابی از پایین‌ترین سطح (قطعات) تا بالاترین سطح (محصول کامل) و بررسی علل و اثرات آنها می‌باشد. در این مقاله پس از بررسی دقیق عیوب مختلف که امکان رخداد در سامانه کنترلی مورد نظر را دارد جدول ارزش‌یابی با در نظر گرفتن پارامترهای حالت خرابی، علت خرابی، اثر خرابی، شدت خرابی، میزان رخداد و قابلیت کشف، تهیه می‌شود. سپس با توجه به عدد اولویت ریسک (RPN) به دست آمده بحرانی‌ترین حالت خرابی مشخص گردیده و با تمهیدات لازم درصد بالایی از عیوب رفع می‌گردد. بالاترین عدد بحرانی برای حالت اضافه بار می‌باشد. مهمترین علت اضافه بار نیروهای هیدرولیکی وارد شده به رابط اتصال محور موتور و سامانه ی کنترلی می باشد که می توان با افزایش توان موتور و یا کاهش نیروهای هیدرولیکی با اصلاح نیروهای تعادلی فشاری در سامانه آن را کاهش داد. با اقدامات اصلاحی تعریف شده برای تغییر سروموتور و اصلاح مسیر عبور سیال میزان رخداد این خطاها به میزان زیادی کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطا، DFMEA، سامانه کنترلی با عملگر سرو، اقدام اصلاحی.

مقدمه

فناوری موتور سوخت مایع با تراست متغیر یکی از زمینه های مهم فناوری پیشران موشک مایع است. موتورهای سوخت مایع با قابلیت کنترل تراست برتری فنی زیادی در حمل و نقل فضایی و پروازهای مانور فضایی نشان می دهند. علاوه بر این، موتورهای سوخت مایع با تراست متغیر در حال حاضر تنها وسایل موجود برای فرود آهسته و پروازهای مانور بر روی سطح سیاره ها یا قمرها هستند. به عنوان مثال، پس از موفقیت فضاپیمای آپولو، که به موتور فرود ماژول ماه متکی بود، آمریکا اولین کشوری بود که به فرود سرنشین دار روی ماه دست یافت. Change 3 با استفاده از یک موتور رانش متغیر ۷۵۰۰ نیوتن با موفقیت به تصحیح وسط مسیر، ترمز قمری، نزول نیروگاهی و شناور شدن در حین فرود نرم روی ماه دست یافت. از آنجایی که موتور موشک یک دستگاه رهاسازی انرژی با چگالی بالا است، بسیاری از مشکلات فنی با توجه به طراحی بهینه سازی و کنترل رانش باید حل شوند، زیرا مشکلات یک LRE با رانش متغیر کاملاً با مشکلات یک LRE رانش ثابت متفاوت است. [۱]

فرایند کنترل تراست در موتورهای سوخت مایع با روش های مختلفی کنترل می شود. استفاده از تراتل ها (سامانه های کنترلی با عملگر سروو)، انژکتورهای با سطح مقطع متغیر، استفاده از پمپ های الکتریکی به جای توربوپمپ، استفاده از سیستم تغذیه تحت فشار و روش های دیگر از جمله این روش ها است. [۳,۲]

فناوری درایو موتور سروو یکی از فناوری های کلیدی ماشین ابزارNC ، ربات صنعتی و سایر سیستم های مکانیکی مهم کنترل است . وانگ یسو و همکاران [۴] طراحی و تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و بهینه سازی کنترلر سروو قرقره هواپیما را انجام داده اند. از طریق تجزیه و تحلیلFMEA ، با توجه به مراحل تعریف محصول، تقسیم سلسله مراتب ، ایجاد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان، قطعات اصلی ضعیف و حالت های خطای آنها، مانند خازن های الکترولیتی در منبع تغذیه سوئیچینگ، تنظیم کننده های ولتاژ در مدار کلیسترون چرخ، عملکرد تقویت کننده بررسی شده است .مین لو و همکاران [۵]، یک روش

ارزیابی قابلیت اطمینان (F-VMEA) با ترکیب FMEA و VMEA (حالت تغییر و تحلیل اثر) پیشنهاد شده که امکان‌سنجی آن توسط سروو ولو تأیید می‌شود. وانگ و همکاران [۶] از روش شبیه‌سازی برای یافتن حالت خطای احتمالی درایور سروو استفاده کرده و پارامترهای کلیدی که می‌توانند تخریب سیستم را مشخص کند، تعیین می‌شوند. ژو سانگ و همکارانش [۷] به بررسی اجزای سروو موتور یک دستگاه ماشینکاری و عملکرد هر یک از آنها و مکانیسم های خرابی و خرابی هر یک از قطعات را توضیح می دهد.

در این مقاله به بررسی خطاهای احتمالی رخ داده در یک سامانه ی کنترلی که با استفاده از یک عمگر سروموتوری کنترل می شود، با استفاده از تکنیک آنالیز حالت خرابی پرداخته شده است.

تحلیل خطای سامانه ها روش‌های مختلفی دارند و هر روش دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود می‌باشد، که باعث می‌شود نتوان یک روش خاص را برای تمام موارد و اهداف به کار گرفت. در بین روش‌های آنالیز خطا که هم در ایمنی و هم در قابلیت اطمینان کاربرد وسیعی دارد، روش تحلیل حالت‌های خرابی بالقوه و اثرات آن (Failure Modes and Effects Analysis) می‌باشد. این روش یک روش پایه‌ای می‌باشد که می‌توان آن را از مرحله تولید و بر روی هر سطح دلخواه از سطح قطعات تا محصول به کار برد.

FMEA را می‌توان در سطوح مختلفی انجام داد. در سطح سیستم (SYS FMEA) که به منظور تحلیل و بررسی یک سیستم و زیر سیستم‌های آن در ابتدایی‌ترین مراحل طراحی استفاده می‌شود. SYS FMEA عموماً بر حالات بالقوه خرابی که می‌تواند در عملکردهای سیستم رخ دهد، تمرکز می‌کند. این خرابی‌ها از وجود نقصان و یا کمبود در طراحی سیستم و یا وجود تقابل نامطلوب بین عملکرد مولفه‌های سیستم یا زیرسیستم ناشی می‌شود. دامنه‌ی به‌کارگیری این سطح دربرگیرنده مراحل طراحی مفهومی، طراحی جزیی، تکوین، آزمایش و ارزیابی سیستم است و بنابراین ابتدایی‌ترین FMEA می‌باشد که تکمیل می‌شود و به بررسی آثار متقابل اجزا و زیر سیستم‌ها بر یکدیگر و یا بر سیستم می‌پردازد. طرح در این مرحله، فرآیند تکاملی داشته و در آن، چگونگی استفاده از روش‌ها و تکنولوژی‌های مختلف برای رسیدن به یک سیستم ایده‌ال مطرح می‌باشد. نتیجه این تجزیه و تحلیل، اطلاعات اولیه برای اجرای تحلیل خطای طراحی (Design FMEA) می‌باشد.

تحلیل خطای طراحی (DFMEA) روشی نظام‌مند است که به منظور شناسایی و اولویت‌بندی نقص‌ها و کاستی‌های طراحی یک محصول/قطعه که منجر به بروز خرابی‌های بالقوه در محصول می‌شود، به کار گرفته می‌شود و در نهایت اقدام اصلاحی برای حذف آن‌ها صورت می‌پذیرد. در این مقاله، تحلیل خطای مجموعه‌ی الکتروپنوماتیکی فشار بالا در این سطح انجام می‌گیرد.

تحلیل خطای فرآیند (Process FMEA) به منظور شناسایی و اولویت‌بندی نقص‌ها و کاستی‌های فرآیند که منجر به بروز حالت‌های خرابی در قطعه می‌شوند به کار گرفته می‌شود و در نهایت اقدام اصلاحی برای حذف آنها صورت می‌پذیرد.

تحلیل خطا را می‌توان در هر مرحله از تولید محصول بکار برد. FMEA روشی است ازپایین به بالا. یعنی از جزئی‌ترین قسمت یک محصول به تحلیل حالت‌های خرابی بالقوه می‌پردازد تا به کل محصول می‌رسد. در واقع FMEA روشی پیشگیرانه است و تمام اجزاء محصول را مورد تحلیل قرار می‌دهد. این نوع تحلیل برای محصولاتی که از مجموعه‌ها وجزئیات کمتری تشکیل شده باشند سریعتر به نتیجه رسیده و نقاط بحرانی هم زودتر مشخص خواهد شد. ولی اگر خواسته شود در مورد محصولات پیچیده‌تر، سریعتر به نتیجه رسید و اثرات آن را مشاهده کرد، به‌ناچار باید از سطوح بالاتر محصول به اجرای FMEA پرداخت و در زمان مناسب‌تر جزئیات را نیز مورد تحلیل قرارداد. [۸]

مراحل اجرای DFMEA [۹]

انتخاب تیم و برگزاری جلسات

۱- تعیین مناسب اعضای تیم

۲- تعیین مسئول تیم

۳- برگزاری جلسات طوفان ذهنی

۴- استفاده از ابزارهای نظیر نقشه‌ها، دستورالعمل‌های فنی و ...

شناسایی کامل مجموعه

این امر منجر به صرفه‌جویی در زمان و افزایش اثر بخشی و سرعت اجرای تکنیک DFMEA می‌شود.

شناسایی حالت‌های خرابی

حالتی است که سیستم قادر نمی‌باشد خواسته‌های طراحی را برآورده کند، هر چه شکست مشخص‌تر باشد شناسایی تاثیر و علت آن که در ستون‌های بعدی FMEA مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد آسان‌تر خواهد بود، شکست فرآیند وقتی رخ خواهد داد که محصول در مقابل آسیب‌ها محافظت نشده و برآورد شکست یا عواقب منفی کار در فرآیند به خوبی پیش‌بینی نگردیده باشد برای عملیات‌های مشخص شده در ستون دوم FMEA باید شکست‌های بالقوه تعیین گردد. ممکن است برای هر وظیفه یا هر عملیات چند شکست بالقوه وجود داشته باشد.

جهت شناسایی حالات خرابی از روش‌های زیر می‌توان استفاده کرد:

- خطاها و اشتباهات گذشته و گزارشات مربوطه

- سوابق شکست‌های بالقوه‌ای که صرفاً در شرایط محیطی خاص (گرما،سرما،خشکی،گرد و غبار و ...) و یا در شرایط استفاده خاص بروز می‌نماید
- استفاده از اظهار نظر افراد متخصص و با تجربه با استفاده از تکنیک طوفان فکری
- استفاده از نمودار درختی خطا:Fault Tree Analysis (FTA) (در این نمودار عدم عملکرد یک بخش مشخص شده و سپس در شاخه‌های پایین‌تر شکست‌های بعدی مشخص خواهد شد.)
- بررسی گزارشات، نظرات و شکایات مشتری
- بررسی محصولات و فرآیندهای مشابه

حالت خرابی دو نوع است:

۱) حالت خرابی اتفاق افتاده و انجام اقدام اصلاحی ضروری است.

۲) حالت خرابی هنوز اتفاق نیافتاده و انجام اقدامات پیشگیرانه قابل بررسی است.

در FMEA کلیه حالات خرابی اتفاق افتاده و نیز حالتهای خرابی متصور (حالت خرابی که رخ نداده) می‌بایست بیان گردد.

شناسایی اثرات بالقوه‌ی خرابی

اثرات بالقوه ناشی از بروز خطا عبارتست از اثرات حالات خرابی بر مشتری، به بیان ساده اثر خرابی عارضه‌ای است که مشتری بواسطه بروز آن خطا دچار آن می‌شود. لذا در شرح اثرات، به بیان عوارض و مسائلی که مشتری بدلیل بروز خرابی آن را تجربه می‌نماید می‌پردازیم.

منظور از مشتری، می‌تواند مشتری نهایی یا مصرف کننده نهایی محصول، تولیدکننده یا مونتاژ کننده در واحد تولیدی بعدی یا تولید کننده یا مونتاژ کننده داخلی (درهمان واحد تولیدی) باشد.

اثرات خرابی میبایست به صورت کامل بیان شده و تاثیر بر روی مشتری نهایی، خط تولید محصول و فرآیندهای داخلی صنعت بررسی شده و درج گردد.

در زیر برخی اثرات خرابی آورده شده است:

- عدم مونتاژ مناسب در محل مشتری – آسیب رسیدن به تکنسین یا مونتاژکار
- اسقاط قطعه یا مجموعه– دوباره‌کاری فرآیندها
- عدم انطباق ظاهری و نارضایتی مصرف کننده نهایی

شدت خرابی (S)

شدت نشانگر جدی بودن اثر خرابی بالقوه است و ارتباط مستقیمی بین اثر و شدت وجود دارد به عنوان مثال اگر اثر شکست مهم باشد، مانند خطرات جانی، نقض مقررات دولتی و ... شدت بالاتر خواهد بود و بالعکس، اگر تاثیر جزیی باشد، شدت پایین خواهد بود.

تعیین درجه شدت در بیشتر موارد نیازمند بررسی های کارشناسانه فرایند، اجزاء سیستم تولید و نظرات مشتری است. برای ارزیابی شدت اثر از جدول (۱) به عنوان معیار استفاده می‌شود.

جدول ۱: رتبه‌بندی عدد شدت (S)

عدد شدت	شدت اثر	معیار تعیین عدد شدت
۱	هیچ	بدون اثر
۲	خیلی ناچیز	اثر بسیار خفیفی بر عملکرد محصول دارد. مشتری متوجه آن نمی‌شود.
۳	ناچیز	اثر کمی بر عملکرد محصول دارد. مشتری احتمالاً متوجه بروز خطا می‌گردد.
۴	خیلی کم	اثر نسبتاً کمی بر عملکرد محصول دارد. مشتری متوجه بروز خطا می‌شود ولی در صدد رفع آن نیست.
۵	کم	اثر متوسطی بر عملکرد محصول دارد. باعث نارضایتی مشتری شده ونیاز به رفع خرابی وجود دارد.
۶	متوسط	عملکرد محصول افت کرده اما محصول عملکرد دارد. ولی نارضایتی جدی مشتری را بدنبال دارد.
۷	زیاد	عملکرد محصول و رضایت مشتری به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و احتمال بروز اختلال در ماموریت محصول وجود دارد.
۸	خیلی زیاد	محصول عملکرد ندارد و انجام ماموریت محصول قطعاً مختل می‌شود. اما امکان پیشگیری از بروز خطرات وجود دارد.
۹	خطرناک	محصول عملکرد ندارد و ماموریت محصول انجام نشده و با خطراتی (انسان، تجهیزات و محیط زیست) همراه است.
۱۰	فاجعه آمیز	محصول عملکرد ندارد و ماموریت محصول انجام نشده و خطراتی فاجعه آمیز و بحرانی (انسان، تجهیزات و محیط زیست) به دنبال دارد.

علل بالقوه خرابی

علل حالات خرابی بالقوه، وجود نقص در سیستم، طراحی یا فرآیند را نشان می‌دهد. گاهی در وقوع یک حالت خرابی علت‌های مختلفی تاثیر دارند که هر یک نقش و سهم متفاوتی در امکان وقوع آن خرابی دارند که در این صورت می‌توان جهت طبقه‌بندی

علل شکست بالقوه از یک نمودار پارتو استفاده نمود. تیم FMEA میتواند نسبت به کمی کردن و برآورد سهم هر یک از علتها در ایجاد شکست اقدام نمایند، لازم به ذکر است جهت شناسایی علل ریشه‌ای از تکنیکهایی مانند نمودار علت و معلول، نمودار درختی، طوفان فکری و پنج چرا (WHY5) و... استفاده نمود.

احتمال وقوع (O)

احتمال وقوع حالت خرابی می‌باشد که با توجه به میزان وقوع علل خرابی قابل تخمین است. میزان وقوع را می‌توان با بررسی کامل و دقیق سوابق به صورت کمّی با اعداد و ارقام واقعی بیان نمود. ولی برای مواردی که سوابق موجود نباشد یا حالت‌های خرابی بالقوه باشند به ناچار باید به صورت کیفی بیان کرد. برای این منظور جدول شماره‌ی (۲) تهیه شده است که مطابق تعاریف مشخص و قراردادی، نمره‌های از ۱تا۱۰ برای هریک از میزان‌های وقوع اختصاص می‌دهد.

جدول ۲: رتبه‌بندی عدد رخداد (O)

رتبه	نرخ میزان رخداد	میزان وقوع
۱۰	برای بیش از ۹۵ درصد قطعات رخ می‌دهد	حتماً
۹	برای ۸۰ تا ۹۵ درصد قطعات رخ می‌دهد	بسیار زیاد
۸	برای ۵۵ تا ۸۰ درصد قطعات رخ می‌دهد	زیاد
۷	برای ۳۵ تا ۵۵ درصد قطعات رخ می‌دهد	اغلب
۶	برای ۲۰ تا ۳۵ درصد قطعات رخ می‌دهد	معمولاً
۵	برای ۱۰ تا ۲۰ درصد قطعات رخ می‌دهد	گاه و بیگاه
۴	برای ۷ تا ۱۰ درصد قطعات رخ می‌دهد	شانس کم
۳	برای ۵ تا ۷ درصد قطعات رخ می‌دهد	شانس ناچیز
۲	برای ۳ تا ۵ درصد قطعات رخ می‌دهد	نادر
۱	برای کمتر از ۳ درصد قطعات رخ می‌دهد	خیلی به ندرت

کنترل‌های جاری

در DFMEA کنترل‌هایی هستند که تا حد امکان از وقوع حالت خرابی جلوگیری می‌کنند و یا وقوع خرابی را تشخیص می‌دهند. این کنترل‌ها می‌توانند در ایستگاه مورد نظر و یا در ایستگاه‌های بعدی اعمال شوند. مانند SPC و کنترل چشمی و ...

دو نوع کنترلهای طراحی/ فرآیند مورد نظر می باشد:

پیشگیرانه: کنترل‌های روی علت‌های خرابی که از وقوع خرابی جلوگیری میکنند. همان کنترلهای فرایندی درCP می‌باشند. این کنترلها نرخ وقوع خرابی را کاهش می‌دهد.

تشخیص: کنترل‌های روی حالت‌های خرابی بوده و به اقدامات اصلاحی منجر می‌شود.

عدد تشخیص(D)

عدد تشخیص، عددی است که براساس کنترل‌های جاری قابل ارزیابی است. عدد تشخیص را می‌توان با بررسی کامل و دقیق کنترل‌های جاری و تطبیق آن مطابق با تعاریف مشخص و قراردادی بیان کرد. برای این منظور جدول شماره‌ی (۳) تهیه شده است که مطابق تعاریف مشخص و قراردادی، نمره‌هایی از ۱ تا ۱۰ برای هر یک از عددهای تشخیص اختصاص می‌دهد.

جدول ۳: ارزیابی عدد تشخیص (D)

تشخیص	معیار	رتبه
غیر ممکن	یقینا تشخیص وجود ندارد	۱۰
بسیار ناچیز	کنترل‌ها به احتمال زیاد تشخیص ندارند	۹
ناچیز	کنترل‌ها شانس بسیار کمی دارند	۸
خیلی کم	کنترل‌ها شانس بسیار کمی برای تشخیص دارند	۷
کم	کنترل‌ها ممکن است تشخیص دهند	۶
متوسط	کنترل‌ها ممکن است تشخیص دهند	۵
متوسط مایل به زیاد	کنترل‌ها شانس خوبی را برای تشخیص دارند	۴
زیاد	کنترلها شانس خوبی را برای تشخیص دارند	۳
خیلی زیاد	کنترلها تقریبا همیشه عیوب را تشخیص می دهند	۲
خیلی زیاد	کنترل حتما تشخیص می دهد	۱

عدد اولویت ریسک (Risk Priority Number = RPN)

برای هر حالت خرابی بسته به شدت خرابی (S) ، رتبه وقوع (O) و عدد تشخیص (D) مطابق با جداول مربوطه ۳ عدد اختصاص داده می‌شود که معیار کیفی از میزان شدت خرابی، رتبه وقوع و عدد تشخیص حالت خرابی می‌باشد. از ضرب این ۳ عدد در یکدیگر عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰ (در روش ۱۰ سطحی) به دست می‌آید که نمایانگر وضعیت حالت خرابی در فرآیند می‌باشد که به این عدد RPN یا عدد الویت ریسک می‌گویند.

(۱) RPN = شدت خرابی × میزان رخداد × قابلیت کشف

به هر میزانی که RPN به ۱۰۰۰ نزدیک باشد ریسک حالت خرابی بالا است و معنایش این است که بر اساس معیارهای تعیین شده

از اهمیت بیشتری برخوردار است و باید در اولویت اقدامات اصلاحی قرار گیرد. به هر میزانی که RPN به یک نزدیک باشد ریسک حالت‌خرابی پایین است. پس از تعیین عدد اولویت ریسک بر مبنای جدول شماره ۴ اقدام اصلاحی برای رفع آن حالت خرابی تعریف می‌شود.

جدول ۴: جدول اولویت‌بندی حالات خرابی بر اساس عدد RPN

تفسیر کیفی	نام محدوده	محدوده‌ی RPN
ریسک پایین- ریسک قابل پذیرش	عادی	۰ < RPN< ۶۴
ریسک متوسط- ریسک قابل پذیرش و توصیه به انجام اقدام اصلاحی	هشدار	۶۴ ≤ RPN< ۱۲۵
ریسک بالا- ریسک نامطلوب و مستلزم اقدام اصلاحی	بحرانی	۱۲۵ ≤ RPN< ۵۱۲
ریسک بسیار بالا- ریسک غیر قابل پذیرش و نیاز به اقدام اصلاحی فوری	فاجعه‌بار	≤ RPN< ۱۰۰۰ ۵۱۲

نتایج

جداول کامل تحلیل آنالیز خطا توسط تیم تشکیل شده و عدد اولویت ریسک هر حالت خرابی مشخص گردیده است. در جدول شماره ۵، حالت های خرابی و ساز و کار رخ دادن آن ها مشخص شده است. در این جدول به دلیل سهولت در جانمایی به هر حالت خرابی یک کُد اختصاصی تخصیص یافته و در جداول بعدی استفاده شده است.

جدول ۵: حالات خرابی و ساز و کار بروز آن

کد حالت خرابی	حالت خرابی	ساز و کار بروز خرابی
SMFM1	اضافه بار موتور	افزایش گشتاور، افزایش نیروی محوری
SMFM2	حرارت زیادی موتور	اصطکاک داخلی قطعات، مقاومت الکتریکی سیم ها
SMFM3	اضافه ولتاژ موتور	شکست عایق، تغییر مقاومت،
SMFM4	اضافه سرعت موتور	شار مغناطیسی غیر یکنواخت، ضربه خارجی
SMFM5	باز نشدن براش ها	ضربه مکانیکی یا فرسودگی قطعات
SMFM6	عدم هم محوری موتور و سامانه ی کنترلی	ساخت و تولید و خطای ابزار ماشین کاری
SMFM7	نشتی از رابط اتصال محور موتور به سامانه کنترلی	خروج سیال به بیرون و آسیب به موتور
SMFM8	قفل شدن حرکت دورانی	خطا در طراحی گیربکس یه مشکلات الکتریکی
SMFM9	تنظیم نشدن سامانه کنترلی	تغییر ضرایب سختی المان های ارتجاعی، تغییر پارامترهای هیدرولیکی سامانه
SMFM10	تشدید ارتعاشات سامانه ی کنترلی	نابالانسی سرو موتور، تشدید اغتشاشات جریان

جدول شماره ی ۶ مقادیر شدت، احتمال وقوع و عدد تشخیص هر یک از حالت های خرابی را نشان می دهد.

جدول ۶: مقادیر شدت، احتمال وقوع و تشخیص حالات خرابی

حالت خرابی	عدد شدت	احتمال وقوع	عدد تشخیص
SMFM1	۵	۸	۶
SMFM2	۴	۳	۵
SMFM3	۳	۴	۵
SMFM4	۴	۵	۴
SMFM5	۴	۴	۳
SMFM6	۳	۷	۲
SMFM7	۴	۳	۳
SMFM8	۴	۳	۴
SMFM9	۴	۵	۳
SMFM10	۶	۳	۳

با توجه به جدول ۶، عدد RPN محاسبه و اقدامات اصلاحی در جدول شماره ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج به دست آمده از تحلیل آنالیز خرابی

حالت خرابی	عدد RPN	اقدام اصلاحی
SMFM1	۲۴۰	تغییر موتور اصلاح مسیر هیدرولیکی
SMFM2	۶۰	
SMFM3	۶۰	

SMFM4	۸۰	
SMFM5	۴۸	
SMFM6	۸۴	اصلاح کوپلینگ اتصال و هم محوری با سامانه
SMFM7	۳۶	
SMFM8	۴۸	
SMFM9	۶۰	
SMFM10	۵۴	

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

پس از بررسی دقیق عیوب مختلف که امکان رخداد در سامانه مورد نظر دارد جدول ارزشیابی تهیه شد. بالاترین عدد بحرانی برای حالت اضافه بار موتور می‌باشد.

مهمترین علت اضافه بار نیروهای هیدرولیکی وارد شده به رابط اتصال محور موتور و سامانه ی کنترلی می باشد که می توان با افزایش توان موتور و یا کاهش نیروهای هیدرولیکی با اصلاح نیروهای تعادلی فشاری در سامانه آن را کاهش داد.

مراجع

[1] Zhaohui Yao, Yiwen Qi, Wen Bao, and Tianhong Zhang, “Thrust Control Method and Technology of Variable-Thrust Liquid Engine for Reusable Launch Rocket,” *Aerospace*, Vol. 10, No. 32, 2023.

[2] Peng Cui, Qinglian Li, Peng Cheng, and Lanwei Chen, “System scheme design for LOX/LCH4 variable thrust liquid rocket engines using motor pump,” *Acta Astronautica*, Vol. 10, No. 171, pp. 139-150, 2020.

[3] Sergio P´erez-Roca, Julien Marzat, et al., “A survey of automatic control methods for liquid-propellant rocket engines,” *HAL Aerospace Sciences*, pp. 1-22, 2019.

[4] Wang Yejian,Wen sheng, Horse Yunzhu. Design and reliability analysis of aircraft anti-skid controller based on DSP [J]. Information Technology, 2018.

[5] M. Luo, S. Zeng, J. Guo and C. Yang, "Reliability analysis approach for variation by integrating FMEA with VMEA," 2014 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan),Zhangiiaijie, 2014,

[6] Han Wang, Zeyu Zhang, Jiang Long, “Reliability Evaluation Method for Robot Servo System Based on Accelerated Degradation Test”, 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.

[7] Baek-Ju Sung, Jong-Bae Lee,” Reliability Improvement of Machine Tool changing Servo Motor”, Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 1, No. 1, pp. 28~32, 2011.

[8] Dan Ling, Hong-Zhong Huang, et al., “Design FMEA for A Diesel Engine Using Two Risk Priority Numbers,” *HAL IEEE*, 2012.

[۹] م. خرسندی، ع. جعفرقلی، و د. صادق نژاد، تحلیل خطای سامانه‌ی الکتروپنوماتیکی فشار بالا در یک موتور سوخت مایع خاص “، *ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی*، ۲۰۲۰.