



آنالیز حالات شکست بحرانی و اثرات آن بر سیستم اسپیندل موتور تراش C.N.C. در شرایط عدم قطعیت

معصومه لاجوردی^۱، مسعود واسعی^{۲*}، حوری داودی^۳، محمدرضا نصیری جان آقا^۴، میلاد ابوالقاسمیان^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، پردیس فنی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴- عضو هیئت علمی، گروه مدیریت، مؤسسه آموزش عالی سهروردی، قزوین، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Masoud.vaseei@liau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۶ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

اسپیندل

C.N.C.

عدم قطعیت

تجزیه و تحلیل حالات شکست بحرانی و اثرات آن روشی شامل از یک سری از پیوندها بین حالات خرابی، اثرات و علل خرابیها است. برای این منظور، در این مقاله به شناسایی و آنالیز حالات شکست و اثرات آن‌ها در سیستم اسپیندل موتور تراش C.N.C. با روش FUZZY FMECA، برای جلوگیری از بروز خرابی‌های ناخواسته در سیستم اسپیندل و انجام عملیات ایمن و قابل اطمینان آن ارائه شده است. بدین منظور، ابتداء مرزهای سیستم مشخص شده است و با توجه به اهداف آنالیز به اجزاء آن تقسیم شده است. اثرات هر یک از حالات خرابی در طول یک دوره یک‌ساله برای اجزاء و قطعات اسپیندل ماشین C.N.C. شناسایی شده است. سپس، شدت هر یک از خرابی‌ها مشخص گردید و اقدامات اصلاحی مشخص شده است. تعداد خرابی‌های شناسایی شده با استفاده از این روش ۱۳ مورد است. بر اساس نتایج، بالاترین مقدار شدت خرابی‌ها مربوط به بخش فنر پروانه‌ای، مخزن روغن و پیستون است که با عدد شدت ۳ مشخص شده‌اند. درحالی‌که، کمترین شدت اثر مربوط به کنداکتور، رمزگذار و یاتاقان با عدد شدت ۱ است. علاوه بر این، بیشترین تعداد خرابی‌ها نیز در مخزن روغن شناسایی شده است. در این مقاله یک سیستم برای مستندسازی خرابی‌ها و رویدادها برای پیشرفت سطح ایمنی سیستم و انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده برای کاهش احتمال وقوع خرابی‌ها و پیامدهای ناشی از آن ارائه می‌کند که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار برنامه ریزان واحد نگهداری و تعمیرات قرار دهد.

Failure mode effects and criticality analysis on C.N.C lathe engine spindle system in uncertain condition

Masoumeh Lajvardi¹, Masoud Vaseei^{2*}, Hoori Davoodi³, Mohammadreza Nasiri Jan Agha², Milad Abolghasemian⁴

1- PhD Candidate, Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2-Faculty Member, Department of Industrial Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

3- MSc Graduate, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

4- Faculty Member, Department of Management, Sohrevardi Higher Education Institute, Qazvin, Iran

* Corresponding Author's Email: Masoud.vaseei@liau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 3 November 2023

Accepted: 15 February 2024

Keywords:

Spindle

C.N.C.

Uncertain

Abstract

Analyzing critical failure modes and their effects is a method that involves establishing a series of links between failure modes, effects, and causes of failures. For this purpose, this article, to identify and analyze the failure modes and their effects on the spindle system of the C.N.C. lathe engine. The FMECA FUZZY method is provided to prevent unwanted failures in the spindle system and to perform its safe and reliable operation. For this purpose, the beginning of the boundaries of the system has been determined and according to the goals of the analysis, it has been divided into its components. The effects of each failure mode during one year for CNC machine spindle components and parts has been identified. Then, the severity of each failure was determined and corrective measures were determined. The number of failures identified using this method is 13. Based on the results, the highest value of damage severity is related to the part of the propeller spring, oil tank, and piston, which are marked with a severity number of 3. While, the lowest intensity of the effect is related to the contactor, encoder, and bearing with an intensity number of 1. In addition, the highest number of failures has been detected in the oil tank. In this article, a system for documenting failures and events to improve the safety level of the system and perform planned preventive maintenance and repairs to reduce the probability of failure and its consequences is presented, which can provide valuable information to unit planners in maintenance and repairs.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Lajvardi M, Vaseei M, Davoodi H, Nasiri Jan Agha M, Abolghasemian M. Failure mode effects and criticality analysis on C.N.C lathe engine spindle system in uncertain condition. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Feb 20;10(12):1-12. doi: 10.22034/IJME.2024.420051.1856 [In Persian]

۱- مقدمه

ماشین ابزار کنترل عددی کامپیوتری^۱ یک سیستم مکانیکی پیچیده با خودکار سازی سطح بالا و ساختار پیچیده است، که شامل اجزا مکانیکی، الکترونیکی و هیدرولیکی است. امروزه تقریباً تمام صنایع برای فرآیندهای تولید خود به ماشین ابزارهای کنترل عددی کامپیوتری نیازمند هستند [۱]. بر اساس گزارش بازار ماشین ابزار جهانی که در سال ۲۰۱۹ منتشر شده است، سامانه‌های اسپیندل ماشین‌های ابزار کنترل عددی کامپیوتری بیش از پیش حائز اهمیت هستند، زیرا افزایش تقاضای جهانی، توجه به میزان کارایی، قابلیت اطمینان و بهره‌وری بالاتر در صنایع تولیدی امروزه منجر می‌شود که استفاده از سیستم ماشین ابزار کنترل عددی کامپیوتری به دلیل سرعت عمل بالا مورد توجه قرار بگیرد [۲].

اسپیندل موتور تراش CNC، دو وظیفه اصلی را بر عهده دارند [۳، ۴]: چرخش ابزار به‌طور دقیق در فضای مورد نظر (در برخی موارد، قطعه) و انتقال انرژی مکانیکی طراحی شده به منطقه برش برای جداسازی فلز. برای این منظور، قابلیت اطمینان و عملکرد سیستم اسپیندل عامل تعیین کننده‌ای است که از میزان برداشت فلز مورد نیاز و کیفیت قطعات ماشین کاری شده پشتیبانی می‌کند و حتی برای کارایی و بهره‌وری ماشین‌های CNC مهم است. عموماً خرابی‌های سامانه‌های اسپیندل موتور تراش CNC موجب افزایش پیامدهای فاجعه باری در عملکرد مؤثر ماشین‌های CNC می‌شود که نه تنها باعث اختلال در تولید می‌شود، بلکه بر قیمت‌های ماشین کاری محصولی که نیز قرار است تولید شود، تأثیر می‌گذارد [۳، ۴]. تجزیه و تحلیل خرابی اسپیندل موتور تراش ماشین‌های CNC به عنوان سیستم کلیدی، اقدامی مهم برای کارخانه تولیدی ماشین‌های CNC، بشمار می‌رود [۳، ۵-۸].

تحلیل خرابی، گام اصلی برای قابلیت اطمینان، قابلیت دسترس پذیری، عملکرد، و قابلیت نگهداری برای دستگاه‌ها و همچنین سامانه‌های پیچیده است. مشخصاً، تحلیل خرابی سیستم اسپیندل موتور تراش ماشین‌های CNC می‌تواند منجر به شناسایی مواردی شود که عبارت است از: اجزاء و ساختارهای سیستم اسپیندل که نسبت به سایر اجزاء، بحرانی تر هستند، تعیین حالات خرابی آن‌ها، اثرات خرابی، و علل خرابی آن‌ها که توجه ویژه به عملیات ایمن و مطمئن را می‌طلبد. همچنین، توصیه‌هایی مانند فعالیت‌های پیشگیرانه و همچنین اقدامات اصلاحی به کاربران نهایی ماشین‌های CNC را ارائه می‌کند تا اطمینان حاصل شود که وظایف اصلی آن‌ها همان‌طور که طراحی شده و انتظار می‌رود، انجام می‌شود یا خیر [۴، ۹-۱۳].

روش اجرای تحلیل خرابی را می‌توان در سه دسته اجرایی طبقه‌بندی کرد. این سه روش عبارت‌اند از ذهنی، عینی و روش‌های نیمه عینی. در روش اجرای ذهنی، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای پیش‌بینی حالات خرابی بکار گرفته می‌شود. در روش‌های عینی، از چک فهرست‌های "چه می‌شود اگر"^۲ و روش‌های نیمه عینی، از تحلیل حالات خرابی و اثرات آن^۳، یا روش‌های ارتقاء یافته آن، مانند تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن^۴ استفاده می‌شود [۱۴، ۱۵]. به‌عنوان مثال، اخیراً لی و همکاران [۱۶] با استفاده از روش‌های ذهنی بیشترین تمرکز را بر تحلیل و ارزیابی قابلیت اطمینان داشته‌اند و با استفاده از مدل تحلیل عناصر محدود و منحنی توزیع تجمعی حجم برش تصادفی ماشین‌های ابزار کنترل عددی کامپیوتری، توانسته‌اند تحلیل قابلیت اطمینان سیستم اسپیندل ماشین ابزار کنترل عددی کامپیوتری، را نهایی نمایند. جیانگ و همکاران [۱۷] ارزیابی قابلیت اطمینان یا تاقان سیستم اسپیندل ماشین ابزار را بر اساس شناسایی و تحلیل ویژگی‌های لرزش انجام دادند. جاناک و همکاران [۳] در مورد فرصت‌های پیاده‌سازی حسگرها در سیستم اسپیندل ماشین ابزار CNC، مطالعه کرده‌اند و علاوه بر آن، روش انجام نظارت را مورد بررسی بیشتری قرار دادند. هی [۱۸] آخرین پیشرفت‌ها در تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌های ابزار CNC را بررسی کرده است. برای این منظور، روش‌های تحلیل اصلی و فن‌های مدل سازی مورد استفاده در ارزیابی قابلیت اطمینان ماشین‌ابزارهای CNC در این مطالعه به‌صورت موردی نشان داده شده است. پیکاج و زبینیسکی [۱۹] مشکل پیش‌بینی عدم تعادل سیستم مکانیکی اسپیندل ماشین‌های ابزار CNC را با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی ارائه کرده‌اند. پیکاج [۲۰] در مطالعه خود در مورد تشخیص خطا در سرعت چرخش اسپیندل CNC را به کمک سیگنال اولتراسونیک با استفاده از شبکه‌های عصبی در نظر گرفته است. آزمایش‌ها بر روی یک جسم آزمایشگاهی در زمان واقعی انجام شده است. نتایج تحقیقات نشان دهنده قابلیت به کارگیری چارچوب پیشنهادی است. چن و همکاران [۲۱] در مطالعه خود ویژگی‌های

¹ Computer Numerical Control (C.N.C.)

² What if Questions

³ Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

⁴ Failure Mode, Effects & Criticality Analysis (FMECA)

عملکرد شکست را برای گسترش عملکرد کیفیت^۱ ترکیب می‌کند. نتایج نشان داد که از این روش برای بهبود سریع سطح در دسترس بودن اسپیندل موتوری در ماشین‌کاری با CNC می‌توان استفاده کرد. لئو و همکاران [۲۲] در یک مطالعه مروری، پیشرفت تحقیقات در مورد سازوکار افزایش دقت و رویکردهای حفظ دقت ماشین‌ابزار CNC را ارائه نمودند. وو و همکاران [۲۳] روش متفاوتی را بر اساس افزایش داده‌ها و شبکه‌های عصبی ارتباطی پیشنهاد نمودند. این روش ابتدا سیگنال‌های ارتعاش یا ناقان نورد را با توجه به معیار تجزیه بهینه، تجزیه حالت متغیر ارائه می‌کند. سپس، حالت‌های مختلف خرابی را با توجه به ویژگی‌های فرکانس خطا انتخاب می‌کند و حالت‌های انتخاب‌شده را توسط فیلترهای باند گذر به سیگنال‌های زیر باند فیلتر می‌کند. ژیانگ و همکاران [۲۴] یک رویکرد جدید از ترکیب تجزیه حالت متغیر و شبکه‌های عصبی ارتباطی عمیق برای رسیدگی به ارتعاش در ماشین‌های ابزار پیشنهاد کرده‌اند. عادل و همکاران [۲۵] در مطالعه خود به کاربرد روش فازی تجزیه و تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن برای ارزیابی رتبه‌بندی حالات خرابی بحرانی در شرکت‌های تولیدکننده صابون در کشور یمن پرداخته‌اند.

مقالات فوق‌الذکر نمی‌توانند به شناسایی اجزاء بحرانی، حالات خرابی و همچنین علل خرابی سیستم اسپیندل ماشین‌ابزار کنترل عددی کامپیوتری که قرار است در این مطالعه مورد بحث قرار بگیرد، کمکی بکنند. در مطالعات فوق‌الذکر عمدتاً به شناسایی حالات خرابی در سامانه‌ها پرداخته شده است، و بندرت به اولویت‌بندی و تعیین اهمیت هر یک از حالات خرابی می‌پردازد. به عبارت دیگر، مراحل مربوط به پیاده‌سازی تحلیل حالات خرابی و اثرات آن‌ها و تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن‌ها در خصوص تحلیل خرابی یا تحلیل ریسک به سختی در مقالات موجود به چاپ رسیده، مشاهده می‌شود.

بر اساس مطالعات بررسی شده، طبق دانش به دست آمده شکاف عمده در مطالعات برای تحلیل کامل خرابی‌های سیستم اسپیندل موتور تراش ماشین‌ابزار CNC برای شناسایی خطای اجزا بحرانی، حالات خرابی، اثرات خرابی و علل خرابی‌ها شناسایی شده است. بنابراین در این مقاله سهم اصلی و مشارکت این تحقیق عبارت است از تحلیل حالات بحرانی خرابی سیستم اسپیندل موتور تراش ماشین CNC است. بدین منظور، منطق فازی برای غلبه بر شرایط عدم قطعیت که در حوزه تحلیل خرابی سامانه‌های اسپیندل موتور تراش ماشین‌های CNC را با محدودیت مواجه می‌کند، در محاسبات لحاظ شده است. علاوه بر این، توصیه‌هایی به کاربران نهایی ماشین‌های CNC در خصوص فعالیت‌های پیشگیرانه و همچنین، اقدامات اصلاحی با استفاده از روش تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن ارائه می‌گردد. این روش برای نخستین بار در ایران در مورد سامانه‌های اسپیندل موتور تراش ماشین‌های CNC انجام شده است.

۲- روش شناسی

روش تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن یکی از روش‌های ارزیابی و آنالیز قابلیت اطمینان است. این روش برای آنالیز تمام حالات خرابی بالقوه در اجزاء طراحی شده و با تحلیل و محاسبه حالات شکست بحرانی، دلایل و اثرات آن‌ها بر روی سیستم را به خوبی شناسایی و ارزیابی می‌کند [۲۶]. علاوه بر آنالیز قابلیت اطمینان از تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن، می‌توان برای آنالیز نگهداشت پذیری، آنالیزهای ایمنی و امنیتی و آنالیزهای قابلیت امتحان نیز استفاده کرد [۲۷].

امروزه تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن به صورت انتظام مهندسی سامانه‌ها به خوبی استقرار پیدا کرده و به طور مرتب در طراحی سامانه‌های الکترومکانیکی، مکانیکی و دیگر سامانه‌ها کاربرد دارد [۲۸]. تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن در واقع بسط یافته روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن بوده، که مفهوم C.A.^۲ در آن نمایانگر شدت اثرات مختلف است [۲۹]. این روش از دو مرحله اصلی تشکیل شده است. مرحله اول، شناسایی حالات خرابی، اثرات محلی و سرتاسری آن‌ها در سیستم، علل ریشه‌ای حالات خرابی جمع‌آوری شده، و اقداماتی که عموماً مربوط به نگهداری و تعمیرات و عملیات می‌شود که برای حذف حالات خرابی با اجتناب از وقوع علل ریشه‌ای آن‌ها طراحی شده‌اند را شناسایی می‌کند. در حالی که، مرحله دوم با هدف ارزیابی عواقب (اعتبار پذیری) هر اثر بر روی یک حالت خرابی انجام می‌شود [۳۰].

¹ Quality Function Deployment (QFD)

² Criticality Analysis (C.A.)

هدف از به کارگیری روش تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن، تحلیل خرابی‌های سیستم اسپیندل ماشین‌ابزار کنترل عددی کامپیوتری شناسایی حالات خرابی بحرانی از طریق یک مطالعه علمی است. مراحل انجام این روش به‌طور خلاصه به شرح زیر است که در شکل ۱ به صورت شما تیک نشان داده شده است.

مرحله اول: تحلیل سیستم اسپیندل موتور تراش ماشین‌ابزار کنترل عددی کامپیوتری انجام می‌شود.

مرحله دوم: سیستم اسپیندل به اجزاء، قطعات ریز تجزیه می‌گردد.

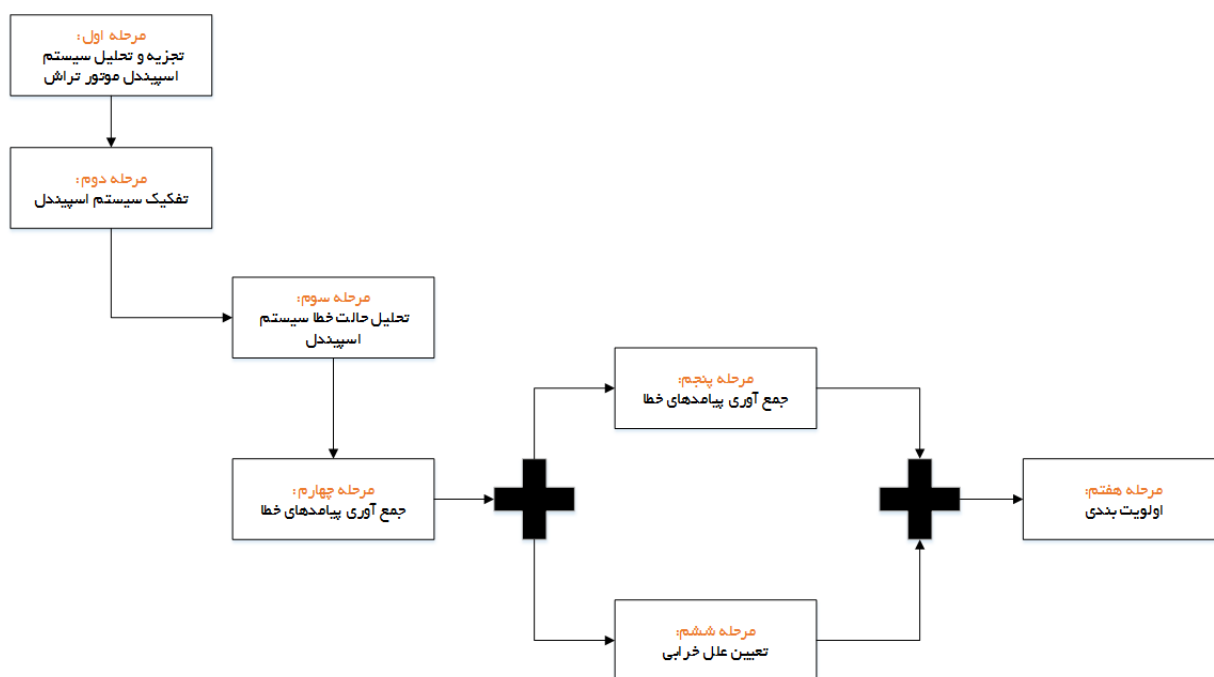
مرحله سوم: در یک دوره معین اجرای فرآیند عملکردی اسپیندل انجام می‌شود و حالات خرابی که در طول این مدت مشاهده می‌شود، ثبت می‌شود. در این مطالعه یک دوره زمانی یک‌ساله از فروردین‌ماه ۱۴۰۱ تا فروردین‌ماه ۱۴۰۲ در نظر گرفته شده است.

مرحله چهارم: پیامدهای هر یک از حالات خرابی مشاهده شده، جمع‌آوری و ثبت می‌گردد.

مرحله پنجم: علل هر خرابی تحلیل می‌شود.

مرحله ششم: شدت هر خرابی را پیدا نموده و سپس اقدامات لازم (اصلاحی و پیشگیرانه) برای جلوگیری از علل خرابی هر یک از حالت خرابی تعیین می‌گردد.

مرحله هفتم: اولویت‌بندی حالات خرابی با کمی سازی اثرات آن‌ها با استفاده از روش فازی تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن صورت می‌گیرد.



شکل ۱ فلوجارت اجرایی روش تحقیق

روش پیاده سازی تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن در حالت فازی به شرح زیر است [۲۷]: ابتدا انتخاب عناصری که بر روی عملکرد سیستم مورد مطالعه تأثیر گذاشته شناسایی می‌گردد و مجموعه عوامل بر اساس رابطه ۱ تشکیل می‌شود.

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\} \quad (1)$$

در رابطه ۱، U نشان دهنده مجموعه عوامل است، و $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$ نیز عوامل تأثیرگذار می‌باشند. از نظر متخصصان یا طراحان سیستم اسپیندل ماشین‌ابزار کنترل عددی کامپیوتری برای ارزیابی عملکرد وسیله استفاده می‌شود و به‌طور مشابه با مجموعه عوامل، مجموعه نظراتی برای حفظ ارزیابی‌ها مطابق با نظر متخصصین ایجاد می‌گردد، مانند:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\} \quad (2)$$

در اینجا، V مجموعه نظرات است، و v_i نیز سطح ارزیابی را نشان می‌دهد. در ارزیابی جامع فازی یک حالت خرابی مشخص K ، برای شناسایی و تعیین عضویت i فاکتور u_i نسبت به سطح عامل v_j ، به روش‌های آماری نیاز است. یعنی، گروهی از خبرگان h راه‌اندازی شده و عامل تأثیرگذار حالت خرابی مشخص u_i توسط خبرگان h در سطح قضاوت v_j انجام می‌گیرد. چنانچه در بین خبرگان h افراد h_{ij} باشد، و طوری قضاوت کنند که u_i به v_j تعلق داشته باشد، در نتیجه مجموعه ارزیابی u_i به صورت زیر خواهد بود:

$$R_i^k = \left\{ \frac{h_{i1}^k}{h}, \frac{h_{i2}^k}{h}, \dots, \frac{h_{im}^k}{h} \right\} = r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im} \quad (3)$$

بردار ارزیابی فازی به دست آمده در یک ماتریس، یعنی ماتریس ارزیابی فازی عاملی R^K مطابق با رابطه ۴ مرتب می‌شوند.

$$R^K = (R_1^k, R_2^k, \dots, R_n^k) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

از آنجایی که هر عامل درجه تأثیر متفاوتی بر روی موضوع پژوهش دارد، وزن‌های مختلف باید تعیین شود. بنابراین، مجموعه وزن‌ها به صورت رابطه ۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n\} \quad (5)$$

با توجه به اینکه $\sum w_i = 1$ و همچنین $w_i > 0$ می‌باشد.

با توجه به موارد فوق، ماتریس سطح اول ارزیابی فازی به دست می‌آید. ماتریس ارزیابی فازی سطح اول R^K حالت خرابی را می‌توان به عنوان هدف ارزیابی مقدار آنتروپی مورد استفاده قرارداد. $h_j = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ مقدار آنتروپی h_j ابزار ارزیابی است. h_j منعکس کننده مقدار آنتروپی شاخص h_j است، که می‌تواند به صورت رابطه ۶ محاسبه شود.

$$h_j = -p \sum f_{jt} \ln f_{jt} \quad (6)$$

در این رابطه، p ضریب همبستگی نظرات است، و با توجه به تعداد مشارکت کنندگان مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود. f_{jt} نشان دهنده نسبت انحراف‌های پارامتر در کل سیستم نشانگر است، که بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{1}{\ln m} \quad (7)$$

$$f_{jt} = \frac{r_{jt}}{\sum_{i=1}^m r_{jt}} \quad (8)$$

سرانجام، بردار وزنی آنتروپی $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n\}$ به صورت معادله ۹ تعیین می‌گردد.

$$w_j = \frac{(1 - h_j)}{\sum_{j=1}^n (h_j)} \quad (9)$$

مجموعه وزن‌های عامل حالت خرابی شناسایی شده به صورت بردار B^K تغییر داده می‌شوند.

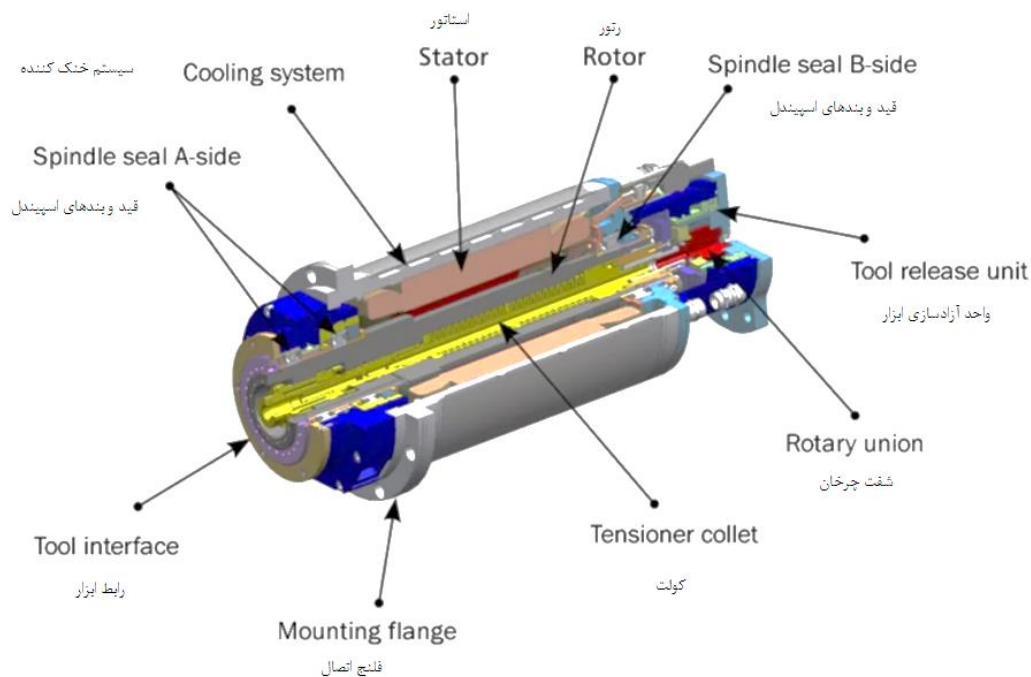
$$B^K = w \cdot R^K = (w_1, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

در نهایت سطح خطر جامع C^K برای نشان دادن درجه آسیب به سیستم برای هر حالت خرابی به صورت معادله ۱۱ تعیین می‌گردد.

$$C^K = B^K \cdot V^T \quad (11)$$

۳- معرفی سیستم اسپیندل در ماشین‌های ابزار کنترل عددی کامپیوتری

سیستم اسپیندل الکتریکی مورد تحلیل در این مقاله، دارای مشخصه ۲۴۰۰۰ دور در دقیقه، ولتاژ ورودی سه فاز، توان ۶ کیلووات، و دارای سیستم هوا خنک است. در ساختار این سیستم از اینورتر برای تبدیل فرکانس استفاده می‌شود. سیستم اسپیندل الکتریکی شامل خود اسپیندل موتور تراش CNC و متعلقات جانبی آن است، عبارت است از: سیستم خنک کننده؛ قید و بندهای اتصال؛ استاتور؛ رتور؛ آزاد سازی قطعه؛ شفت چرخان؛ کولت؛ فلنج اتصال و رابط ابزار. در شکل ۲ نمودار شما تیک ساختار سیستم اسپیندل موتور تراش نشان داده شده است.



شکل ۲ نمودار شما تیک ساختار سیستم اسپیندل موتور تراش

۴- نتایج و بحث

تحلیل کامل خرابی‌های مربوط به سیستم اسپیندل الکتریکی با استفاده از روش فازی تحلیل بحرانی حالات خرابی و اثرات آن طراحی شده انجام شد. در ابتدا، ۱۳ حالت خرابی ۹ جزء سیستم اسپیندل با استفاده از روش سنتی تحلیل حالات خرابی و اثرات آن مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ حالات خرابی هر بخش از اسپیندل و کدهای خطای مربوطه

نام قطعه	کد خطا	نام حالت خرابی
یاتاقان	Fm1	شکست یاتاقان
	Fm2	استهلاک شدید یاتاقان
سوپاپ الکترومغناطیسی	Fm3	تنظیم نامطمئن سوپاپ الکترومغناطیسی
	Fm4	سوختگی سیم‌پیچ سوپاپ الکترومغناطیسی
سوپاپ کمکی	Fm5	تنظیم نامطمئن فشار سوپاپ کمکی
پیستون	Fm6	ترک در پیستون
فنر پروانه‌ای	Fm7	بخش مربوط به فنر پروانه‌ای
کنداکتور	Fm8	چسبندگی نقاط تماس کنداکتور
رمزگذار	Fm9	فرسودگی الکترونیکی رمزگذار ^۱
	Fm10	نشت سیلندر
مخزن روغن	Fm11	نشت در سیلندر
	Fm12	سرخوردن سیلندر
سوئیچ	Fm13	فرسودگی سوئیچ

^۱ Encoder

پس از آن، شدت اثر حالات خرابی مختلف با ترکیب نظریه فازی انجام شده است. در این مقاله، احتمال خرابی (PF)، شدت تأثیر حالات خرابی بر سیستم اسپیندل (S)، کشف (تشخیص) (D) و دشواری در نگهداری و تعمیرات (M) را به عنوان شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، مجموعه علل خرابی‌های سیستم اسپیندل الکتریکی را می‌توان به صورت $U=\{PF, S, D, M\}$ تعیین نمود. علاوه بر این، مجموعه چهار سطحی نظرات متخصصان در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ مجموعه نظرات چهار سطحی متخصصان

عوامل تأثیرگذار	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
سطح احتمال خرابی	کم	گهگاه	برخی مواقع	به کرات
سطح شدت	جزئی	متوسط	جدی	مرگبار
سطح کشف (تشخیص)	آسان	دشواری	بسیار سخت	قابل شناسایی نیست
سطح نگهداری و تعمیرات	اشکال زدایی	نصب مجدد	جایگزینی	غیرقابل نگهداری و تعمیرات

بر اساس نظرات کارشناسان، مجموعه فازی احتمال خرابی، مجموعه فازی شدت، مجموعه فازی تشخیص و هم‌چنین مجموعه فازی نگهداری و تعمیرات حالت خرابی شماره (۱) خواهد بود. به ترتیب زیر: $R_1^1 = \{0.1, 0.7, 0.2, 0\}$, $R_2^1 = \{0, 0.2, 0.8, 0\}$, $R_3^1 = \{0, 0.7, 0.3, 0\}$, $R_4^1 = \{0, 0.2, 0.8, 0\}$ از این رو، بر اساس معادله ۱۲ ماتریس ارزیابی فازی (Fm1) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$R^1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

به‌طور مشابه، ماتریس‌های ارزیابی فازی (Fm2) تا (Fm13) یا (R2 تا R13) به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$R^2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R^3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} \quad R^4 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.7 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^5 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R^6 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix} \quad R^7 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0.5 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^8 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad R^9 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix} \quad R^{10} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R^{11} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} \quad R^{12} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R^{13} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$

بر اساس معادله ۶، مقدار آنتروپی هر یک از حالات خرابی به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$H_2 = (0.686, 0.361, 0.461, 0.486); H_1 = (0.578, 0.361, 0.441, 0.361)$$

$$H_4 = (0.157, 0.352, 0.422, 0.422); H_3 = (0.881, 0.441, 0.578, 0.361)$$

$$H_6 = (0.648, 0.441, 0.361, 0.235); H_5 = (0.648, 0.648, 0.441, 0.441)$$

$$H_8 = (0.578, 0.361, 0.578, 0.578); H_7 = (0.578, 0.680, 0.578, 0.235);$$

$$H_{10} = (0.881, 0.486, 0.486, 0.235); H_9 = (0.578, 0.361, 0.441, 0.235)$$

$$H_{12} = (0.315, 0.515, 0.766, 0.559); H_{11} = (0.578, 0.441, 0.648, 0.361)$$

$$H_{13} = (0.578, 0.486, 0.486, 0.461)$$

بر اساس معادله ۹، وزن‌های فازی هر یک از حالات خرابی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$W_2 = (0.157, 0.318, 0.269, 0.256); W_1 = (0.187, 0.283, 0.248, 0.283)$$

$$W_4 = (0.116, 0.260, 0.312, 0.312); W_3 = (0.069, 0.322, 0.242, 0.367)$$

$$W_6 = (0.152, 0.242, 0.276, 0.331); W_5 = (0.185, 0.185, 0.294, 0.336)$$

$$W_8 = (0.222, 0.336, 0.222, 0.222) ; W_7 = (0.219, 0.166, 0.219, 0.397)$$

$$W_{10} = (0.062, 0.269, 0.269, 0.4) ; W_9 = (0.177, 0.268, 0.235, 0.321)$$

$$W_{12} = (0.146, 0.239, 0.355, 0.260) ; W_{11} = (0.214, 0.284, 0.179, 0.324)$$

$$W_{13} = (0.212, 0.259, 0.259, 0.271)$$

در نتیجه، بردارهای فازی اوزان هر عامل حالت خرابی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B^2 = (0.276, 0.604, 0.121, 0) ; B^1 = (0.187, 0.417, 0.564, 0)$$

$$B^4 = (0.214, 0.417, 0.310, 0.058) ; B^3 = (0.287, 0.374, 0.332, 0.007)$$

$$B^6 = (0.384, 0.303, 0.313, 0) ; B^5 = (0.364, 0.440, 0.196, 0)$$

$$B^8 = (0.199, 0.399, 0.401, 0) ; B^7 = (0.082, 0.429, 0.429, 0)$$

$$B^{10} = (0.275, 0.340, 0.372, 0.013) ; B^9 = (0.124, 0.285, 0.591, 0)$$

$$B^{12} = (0.211, 0.581, 0.208, 0) ; B^{11} = (0.160, 0.520, 0.320, 0)$$

$$B^{13} = (0.331, 0.376, 0.393, 0)$$

با استفاده از فرمول ۱۱، سطح خطر هر یک از حالات خرابی مطابق جدول ۳ به دست می‌آید.

جدول ۳ سطح خطر هر یک از حالات خرابی

ردیف	حالات خرابی	کد	سطح خطر خرابی	ردیف	حالات خرابی	کد	سطح خطر خرابی
1	شکستی یاتاقان	C1	2.55	8	چسبندگی نقاط تماس کنداکتور	C8	2.20
2	فرسودگی شدید یاتاقان	C2	1.85	9	فرسودگی قطعات الکترونیکی رمزگذار	C9	2.47
3	تنظیم نه‌چندان مطمئن سوپاپ الکترومغناطیسی	C3	2.1	10	نشت سیلندر	C10	2.12
4	سوختگی سیم‌پیچ سوپاپ الکترومغناطیسی	C4	2.21	11	نشت در سیلندر	C11	2.16
5	تنظیم نه‌چندان مطمئن فشار سوپاپ کمکی	C5	1.83	12	سرخوردن سیلندر	C12	2
6	ترک در پیستون	C6	1.93	13	فرسودگی سوئیچ	C13	2.06
7	فنر پروانه‌ای	C7	2.41				

شکستگی یاتاقان‌ها، استهلاک قطعات الکترونیکی رمزگذار اسپیندل، سوختگی سیم‌پیچ سوپاپ سلونوئیدی و چسبندگی نقاط تماس کنداکتور، از جمله حالات خرابی‌های بحرانی هستند که هم در طراحی و هم در شرایط کارکرد سیستم اسپیندل الکتریکی به توجه ویژه‌ای نیاز دارند. به‌ویژه، خرابی یاتاقان‌ها عمدتاً ناشی از استهلاک است. فرسودگی قطعات باعث از کار افتادن قطعات الکترونیکی رمزگذار اسپیندل گردیده است. هم‌چنین، حالات خرابی سوپاپ الکترومغناطیسی، نشتی سیلندر، چسبندگی نقاط تماس کنداکتور و استهلاک سوئیچ اطمینان منجر به ناپایداری سیستم اسپیندل الکتریکی می‌گردد، و سیستم نمی‌تواند به کارکردهای از پیش تعیین شده دست یابد و به شدت بر میزان عملکرد سیستم اسپیندل تأثیر منفی می‌گذارد، که این موضوع با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای جمع‌آوری شده، تأیید گردید.

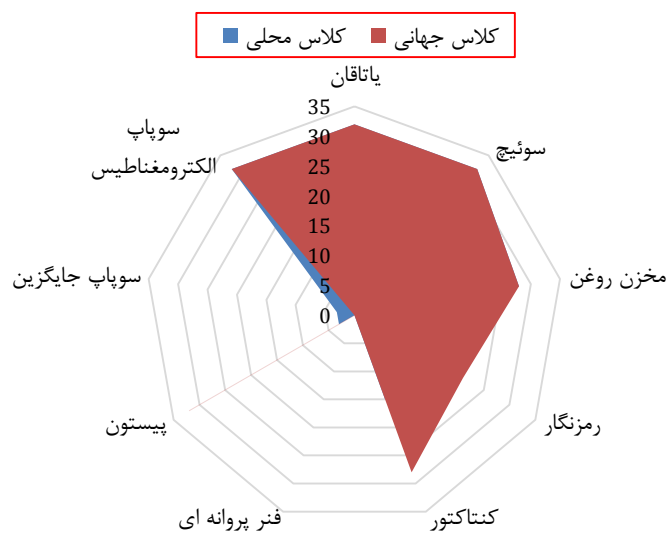
از این‌رو، بازرسی دوره‌ای و سایر اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای عملیات ایمن و مطمئن یاتاقان‌های سیستم اسپیندل الکتریکی پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین، بر اجرا یک سیستم مستندسازی برای ثبت خرابی‌ها و رویدادها برای پیشرفت سطح ایمنی ماشین‌آلات و انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برنامه‌ریزی شده برای کاهش احتمال وقوع خرابی‌ها و پیامدهای ناشی از آن تأکید می‌شود. جدول ۴ نتایج حاصل از اجرای روش تحلیل بحرانی فازی برای سیستم اسپیندل الکتریکی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ نتایج حاصل از اجرا روش FUZZY FMECA برای سیستم اسپیندل الکتریکی ماشین ابزار کنترل عددی کامپیوتری

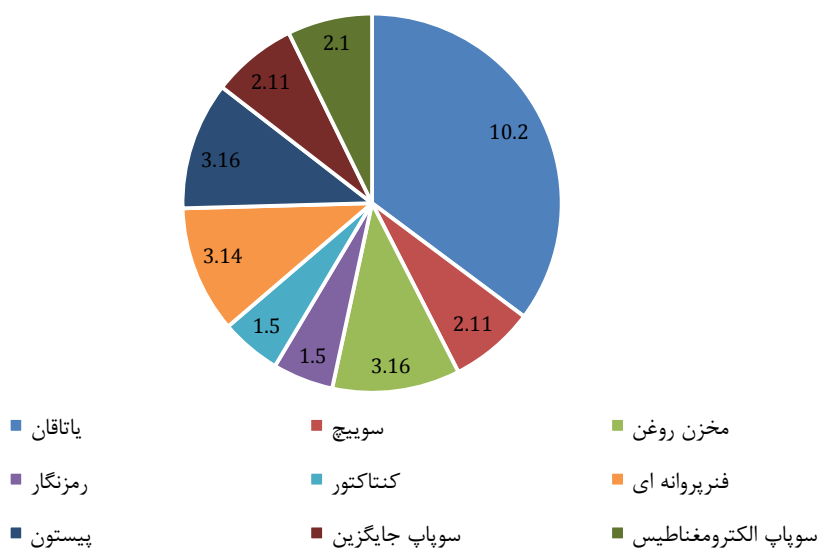
نام قطعه	ماتریس فازی	حالت خرابی	علت خرابی	تأثیر خرابی		شدت خرابی	اقدامات اصلاحی
				تأثیر محلی	تأثیر سرتاسری		
یاتاقان	Fm1	شکست یاتاقان	حجم بار بیش از حد	خرابی یاتاقان	از کار افتادگی	1	تعویض یاتاقان
یاتاقان	Fm2	استهلاک شدید یاتاقان	روغن کاری ناکافی یا ناخالصی‌ها	یاتاقان	خرابی یاتاقان	2	تعویض روغن
سوپاپ	Fm3	تنظیم نامطمئن سوپاپ الکترومغناطیسی	شکستگی فرقره	خرابی پیستون	توقف پیستون	2	تعویض سوپاپ الکترومغناطیسی
الکترومغناطیسی	Fm4	سوختگی سیم پیچ سوپاپ الکترومغناطیسی	جریان بیش از حد	خرابی سلونوئید	از کار افتادن سلونوئید	2	تعویض سیم پیچ
سوپاپ کمکی	Fm5	تنظیم نامطمئن فشار سوپاپ کمکی	شکستگی فرقره	مخزن روغن غیر نرمال	پیستون غیر نرمال	2	تعویض سیم پیچ
پیستون	Fm6	ترک در پیستون	خرابی ماده تشکیل دهنده	پیستون غیر نرمال	عدم موفقیت در تولید	3	تعویض پیستون
فنر پروانه‌ای	Fm7	بخش مربوط به فنر پروانه‌ای	خرابی ماده تشکیل دهنده	الاستیسیته پایین	ابزار قابل تغییر نیست	3	تعویض فنر پروانه‌ای
کنداکتور	Fm8	چسبندگی نقاط تماس کنداکتور	ولتاژ بیش از حد	از کار افتادن کنداکتور	از کار افتادگی کامل	1	افزایش مقدار یک سوسازی رله
رمزگذار	Fm9	فرسودگی الکترونیکی رمزگذار	فرسودگی	خرابی سخت افزاری	عدم موفقیت در تولید	1	تعویض رمزگذار
مخزن روغن	Fm10	نشست سیلندر	خرابی واشر	مخزن روغن بی ثبات	ابزار قابل تغییر نیست	3	تعویض واشر
مخزن روغن	Fm11	نشست در سیلندر	فرسودگی واشر	مخزن روغن بی ثبات	ابزار قابل تغییر نیست	3	تعویض واشر
سوپاپ	Fm12	سر خوردن سیلندر	وجود هوا در مخزن	مخزن روغن بی ثبات	ابزار قابل تغییر نیست	3	بررسی و بهبود وضعیت هوای خروجی
سوئیچ	Fm13	فرسودگی سوئیچ	عملیات مکرر	خرابی سوئیچ	سرعت دورانی بی ثبات	2	تعویض سوئیچ

بر اساس جدول ۴، بیشترین عدد شدت اثر خرابی، مربوط به خرابی‌های فنر پروانه‌ای، مخزن روغن و پیستون با مقدار ۳ است. خرابی‌های مخزن روغن مربوط به سیلندر است، که در نتیجه آن ابزار قابل تغییر نخواهد بود و باید کلاً تعویض گردد. خرابی فنر پروانه‌ای مربوط به نامناسب بوده ماده تشکیل دهنده به دلیل الاستیسیته پایین در فنر آن است که با تعویض فنر می‌توان این حالت

خرابی را از بین برد. خرابی پیستون به دلیل نامناسب بودن ماده تشکیل دهنده به دلیل نرمال نبودن و ایجاد ترک در پیستون است، که سبب عدم موفقیت در تولید می‌شود. با تعویض پیستون این حالت خرابی از بین می‌رود. در دو حالت عدم موفقیت در تولید به وجود می‌آید: ۱- خرابی در پیستون اسپیندل با شدت اثر ۲.۳- خرابی در رمزگذار بر اثر فرسودگی الکترونیکی رمزگذار، با شدت اثر ۱، که در هر دو حالت باید قطعه معیوب تعویض گردد. شکل‌های ۳ و ۴ بر اساس داده‌های جدول ۴ به دست آمده است.



شکل ۳ مقایسه کلاس محلی و جهانی سرتاسری



شکل ۴ شدت اثر و درصد خرابی هر قطعه در سیستم اسپیندل الکتریکی

۵- نتیجه گیری

تحلیل حالات شکست بحرانی به معنای بررسی و تحلیل علل، عوامل و اثرات وقوع یا رخداد حوادث و بحران‌هایی است که می‌توانند منجر به اختلالات جدی در سازمان‌ها، جوامع یا حتی جوامع بین‌المللی شوند. در این تحلیل، هدف اصلی شناسایی عواملی است که به وقوع شکست بحرانی می‌انجامد و ارائه راهکارهایی برای مدیریت و کاهش اثرات احتمالی آنها است. اثرات حالات شکست بحرانی

بسیار متنوع است و به بخشی از اقتصاد، جوامع و افراد تأثیر می‌گذارد. این اثرات می‌تواند شامل غفلت‌های انسانی، تخریب زیر ساخت‌ها، از دست دادن منابع مالی و اقتصادی، از دست دادن اعتبار سازمان‌ها و مؤسسات و غیره باشد.

با تحلیل حالات شکست بحرانی، می‌توان این امکان را داشت که پیش از وقوع یک حادثه بحرانی، مجموعه اقدامات و پاسخ‌های مناسب در نظر گرفته شود تا بتوان از وقوع بحران جلوگیری کرد یا در صورت وقوع، آسیب‌ها و خسارات را به حداقل برساند. این مقاله حالات سنتی خرابی‌ها، تأثیر و تحلیل بحرانی بودن را با استفاده از یک روش ترکیبی بسط داده است، تا با استفاده از نظریه فازی بتواند تحلیل خرابی‌های سیستم اسپیندل موتور تراش CNC را مشخص نماید. برای این منظور، ابتدا ۱۳ مورد خرابی شناسایی شده است. بر اساس نتایج، بالاترین مقدار شدت خرابی‌ها مربوط به بخش فنر پروانه‌ای، مخزن روغن و پیستون است که با عدد شدت ۳ مشخص شده‌اند. در حالی که، کمترین شدت اثر مربوط به کنداکتور، رمزگذار و یاتاقان با عدد شدت ۱ است. علاوه بر این، بیشترین تعداد خرابی‌ها نیز در مخزن روغن شناسایی شده است. بنابراین، بر اساس نتایج به دست آمده مؤلفه‌های بحرانی، حالات بحرانی خرابی‌های مربوط به سیستم اسپیندل که نیازمند توجه ویژه هستند، و نیز شدت اثر هر حالت خرابی و اقدامات اصلاحی لازم برای کاهش اثر شدت خرابی‌ها مشخص شد. با توجه به اینکه شناسایی حالات خرابی در گروه نظر خبرگان سیستمی است، در صورت تغییر خبرگان ممکن است این حالات خرابی تغییر کنند. همچنین، دسترسی به خبرگان در طول تحقیق به سختی میسر می‌شد. این تحقیق برای مطالعه بیشتر پیشنهادی می‌کند که برای اولویت‌بندی حالات خرابی با توجه به درجه اهمیت محاسبه شده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مانند تاپسیس و ویکور استفاده شود. علاوه بر این، روش‌های ترکیبی با روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن نیز می‌تواند مدنظر قرار بگیرد.

References

- [1] Sun J, Sun Z, Chen C, Yan C, Jin T, Zhong Y. Group Maintenance Strategy of C.N.C. Machine Tools Considering Three Kinds of Maintenance Dependence and Its Optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021 Jul 27;124:3749-60. doi: 10.21203/rs.3.rs-466031/v1
- [2] Zuo Y, Wang H, Wu G, Gu Y, Qiao W. Research on Remote State Monitoring and Intelligent Maintenance System of C.N.C. Machine Tools. *The Journal of Engineering*. 2019 Mar 25;2019(8):8671-5. doi: 10.1049/joe.2018.9081
- [3] Abele E, Altintas Y, Brecher C. Machine Tool Spindle Units. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2010 Jul 6;59(2):781-802. doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.002
- [4] Li H, Huang H-Z, Li Y-F, Zhou J, Mi J. Physics of Failure-Based Reliability Prediction of Turbine Blades Using Multi-Source Information Fusion. *Applied Soft Computing*. 2018 Nov 1;72:624-35. doi: 10.1016/j.asoc.2018.05.015
- [5] Zhang Z, Cai L, Cheng Q, Liu Z, Gu P. a Geometric Error Budget Method to Improve Machining Accuracy Reliability of Multi-Axis Machine Tools. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019 Feb;30(1):495-519. doi: 10.1007/s10845-016-1260-8
- [6] Ciou Y-S, Lee C-Y. Controllable Preload Spindle with a Piezoelectric Actuator for Machine Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019 Apr;139:60-3. doi: 10.1016/j.ijmactools.2019.01.004
- [7] Li Y, Zhang X, Ran Y, Zhang W, Zhang G. Reliability and Modal Analysis of Key Meta-Action Unit for C.N.C. Machine Tool. *IEEE Access*. 2019 Feb 15;7:23640-55. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2899623
- [8] Liu Y, Peng H, Yang Y. Reliability Modeling and Evaluation Method of C.N.C. Grinding Machine Tool. *Applied Sciences*. 2018 Dec 21;9(1):14. doi: 10.3390/app9010014
- [9] Lo H-W, Liou J-J, Huang C-N, Chuang Y-C. A Novel Failure Mode and Effect Analysis Model for Machine Tool Risk Analysis, Reliability Engineering and System Safety. 2019 Mar, Elsevier; 183(C):173-183. doi: 10.1016/j.res.2018.11.018
- [10] Singh A, Asjad M, Gupta P. Reconfigurable Machine Tools: A Perspective. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. 2019 Nov 8;8(4):365-76. doi: 10.1007/s41872-019-00096-x
- [11] Yuan R, Tang M, Wang H, Li, H. A Reliability Analysis Method of Accelerated Performance Degradation Based on Bayesian Strategy. *IEEE Access*. 2019 Nov 8;7:169047-54. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952337
- [12] Li Q, Li H. A General Method for Thermal Error Measurement and Modeling in C.N.C. Machine Tools Spindle. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Apr 27;103:2739-49. doi: 10.1007/s00170-019-03665-7
- [13] Li Y-F, Huang H-Z, Mi J, Peng W, Han X. Reliability Analysis of Multi-State Systems with Common Cause Failures Based on Bayesian Network and Fuzzy Probability. *Annals of Operations Research*. 2022 Apr;311(4):195-209. doi: 10.1007/s10479-019-03247-6

- [14] Spreafico C, Russo D, Rizzi C. a State-of-the-Art Review of FMEA/FMECA Including Patents. *Computer Science Review*. 2017 Aug 1;25(7):19-28. doi: 10.1016/j.cosrev.2017.05.002
- [15] Mu D, Wang X. Application of High-Speed Spindle in Intelligent High-Speed Drilling and Tapping Center Machine Tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, China Wuhan. 2019 Mar 22;493(1):012100. doi: 10.1088/1757-899X/493/1/012100
- [16] Li Q, Liao Y, Li F. Reliability Analysis of C.N.C. Machine Tool Spindle under Random Cutting Load. *Journal of Applied Science and Engineering Innovation*. 2015;2(7):287-90.
- [17] Jiang D, Wang T, Jiang Y-X, Liu L, Hu M. Reliability Assessment of Machine Tool Spindle Bearing Based on Vibration Feature. *Digital Manufacturing & Automation (ICDMA) International Conference*, IEEE China Changcha. 2010;2:154-7. doi: 10.1109/ICDMA.2010.105
- [18] Recent Development in Reliability Analysis of N.C. Machine Tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, 2015 Oct 9;85(1-4):115-31. doi: 10.1007/s00170-015-7926-0
- [19] Piecuch G, Żabiński T. Implementation of Computational Intelligence Methods for C.N.C. Machine Spindle Imbalance Prediction. In *Automation 2018: Advances in Automation, Robotics and Measurement Techniques*. Springer International Publishing. 2018 Mar 8;604-12. doi: 10.1007/978-3-319-77179-3_57
- [20] Piecuch G. Rotation Speed Detection of a CNC Spindle Based on Ultrasonic Signal. In *Automation Progress in Automation, Robotics and Measurement Techniques*. Springer International Publishing. 2019 Feb 16;608-15. doi: 10.1007/978-3-030-13273-6_56
- [21] Chen B, Wang Z, Shen G. Research on Availability Function Deployment for Motorized Spindle based on User Requirement. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. 2021 October 30- 1 Nov;2133(1):012031. doi: 10.1088/1742-6596/2133/1/012031
- [22] Liu, W., Zhang, S., Lin, J., Xia, Y., Wang, J., Sun, Y. Advancements in Accuracy Decline Mechanisms and Accuracy Retention Approaches of C.N.C. Machine Tools: A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022 Aug;121(11-12):7087-115. doi: 10.1007/s00170-022-09720-0
- [23] Wu Y, Liu L, Qian S. a Small Sample Bearing Fault Diagnosis Method Based on Variational Mode Decomposition, Autocorrelation Function, and Convolutional Neural Network. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021 Nov;124(11-12):1-12. doi: 10.1007/s00170-021-08126-8
- [24] Jiang Y, Chen Y, Xing X. Variational Mode Decomposition for Deep Convolutional Neural Networks in Underwater Acoustic Communication. *Research Square*. 2023 Feb 15. doi: 10.21203/rs.3.rs-2578843/v1
- [25] Qiad, A-A-A, Ahmad, R, Badiea, A-M, Mustafa, S-A. Application of Fuzzy Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (Fuzzy FMECA) with Extended Rule of Criticality Ranking Assessment: A Case Study in Ghee and Soap Industry. *1st International Conference on Manufacturing Engineering Technology (IConMET 2021)*. 2023 Apr 24;2544(1). doi: 10.1063/5.0117689
- [26] Jun L, Huibin X. Reliability Analysis of Aircraft Equipment Based on FMECA Method. *Physics Procedia*. 2012 Dec;25:1816-1822. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.316
- [27] Cunbaoa M, Zia G, Lin Y. Safety Analysis of Airborne Weather Radar Based on Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. *Procedia Engineering*, 2nd International Symposium on Aircraft Airworthiness (ISAA 2011). 2011 Oct 26-28;17:407-14. doi: 10.1016/j.proeng.2011.10.048
- [28] Blischke W-R, MurthyD-N-P. *Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization*, New York: Wiley; 2000. doi: 10.1002/9781118150481
- [29] Rausand M, Hoyland A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. 2nd ed, Wiley Series in Probability and Statistics; 2003.
- [30] Chen H- X, Gong Y- Q, Baosiriguleng, Qi W.L. Fuzzy FMECA for C.N.C. Machine Tool Spindle System. *Materials Science and Engineering Conference*. 2021 Feb 3;1043(2021):022037. doi: 10.1088/1757-899X/1043/2/022037