

تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات با استفاده از سیستم استنتاج فازی چند مرحله‌ای (مورد مطالعه: نیروگاه برق شهید سلیمی نکا)

الهه شاکری کناری،* محمد ولی پور خطیر،** عبدالحمید صفایی قادیکلانی***

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۲۳ - تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۳

چکیده

اهمیت مقوله نگهداری و تعمیرات از آنجاست که مدیریت کارآمد آن می‌تواند در تداوم خطوط تولید و کاهش هزینه‌ها بسیار موثر باشد. این مسئله در نیروگاه‌های تولید برق به عنوان منبع اصلی تامین انرژی در کشور از اهمیت مضاعفی برخوردار است. هدف از مقاله حاضر ارائه رویکردی کاربردی برای تعیین استراتژی نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر دستگاه است. در همین راستا با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست^۱ فازی و طراحی سیستم استنتاج فازی ریسک شکست‌های مهم دستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین میزان حساسیت دستگاه‌ها نیز برای بررسی بیشتر ارزیابی شد؛ در ادامه با تلفیق نتایج، استراتژی نگهداری و تعمیرات مناسب هر دستگاه تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد، دستگاه "ژنراتور" به عنوان دستگاه اصلی تولید برق در نیروگاه، با شاخص اولویت ریسک ۶,۵۶ و میزان حساسیت ۰,۵۵ در بعد چهارم نمودار شاخص اولویت ریسک-حساسیت کل^۲ می‌گیرد که در این حالت استراتژی مناسب برای این دستگاه، استراتژی نگهداری و تعمیرات پیش اقدامانه است و با توجه به اینکه باقی دستگاه‌ها شامل: ایرپری هیتر، کندانسور توربین، اف‌دی‌فن و الکتروموتور دارای اولویت ریسک بالا و حساسیت پایین هستند، در بعد سوم نمودار قرار گرفتند که استراتژی مناسب برای آن‌ها استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت است.

واژگان کلیدی: استراتژی‌های تعمیرات و نگهداری، سیستم استنتاج فازی، تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست

* کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، مدیریت تولید و عملیات، دانشگاه مازندران

** استادیار، تحقیق در عملیات، عضو هیئت علمی دانشگاه مازندران (نویسنده مسئول)

m.khatir1461@yahoo.com

*** استاد، مدیریت تولید و عملیات، عضو هیئت علمی دانشگاه مازندران

1 Failure Modes & Effect Analysis

2 Risk Priority Number- Total Intensity

مقدمه

در حال حاضر، صنایع در فضای جهانی با فشار رقابتی شدیدی روبه‌رو هستند که برای ادامه بقا در این شرایط داشتن خط تولید با بهره‌وری و کیفیت بالا به همراه حداقل هزینه بسیار حائز اهمیت است. در این راستا سیستم‌های تولیدی برای دستیابی و تضمین بهره‌وری و بقای طولانی‌مدت باید کارآتر، مؤثرتر و اقتصادی‌تر عمل کنند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۴) که فرآیند مناسب نگهداری و تعمیرات یکی از موضوعات قابل توجه در دستیابی به این مهم می‌باشد. تعمیر و نگهداری صحیح، به عنوان ابزاری بسیار مهم در تولید بهره‌ور مطرح است که می‌تواند نقش مهمی را در کاهش هزینه‌های تولید، افزایش ایمنی، افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن دستگاه‌ها ایفا کند (شهین و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین وجود یک برنامه دقیق و مستمر که با توجه به امکانات موجود قادر به افزایش کارایی و قابلیت دسترسی دستگاه‌ها و در نتیجه نیل به حداکثر بهره‌وری در سیستم تولیدی باشد بسیار حائز اهمیت است (ربانی و همکاران، ۱۳۹۲). براین اساس انتخاب یک استراتژی بهینه نگهداری و تعمیرات می‌تواند چاره‌ساز واحدهای صنعتی جهت کاهش ریسک شکست تجهیزات، راندمان تولید و کارایی آن باشد.

یکی از تکنیک‌های متعارف که برای تعریف، شناسایی و حذف خطرات بالقوه در فرآیندها و یا خدمات به کار می‌رود، تجزیه و تحلیل حالات بالقوه خطا و اثرات آن^۱ می‌باشد. یکی از اهداف این تکنیک، ارزیابی ریسک شکست است؛ که از حاصل ضرب سه معیار شدت خطا^۲، احتمال وقوع خطا^۳، و احتمال عدم تشخیص خطا^۴ به دست می‌آید (رفیعی و نمین، ۲۰۱۵). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه به کارگیری این تکنیک در حوزه‌های مختلف بازرگانی، صنعتی و خدماتی انجام شد. علی‌رغم سادگی و قالب فهم بودن تکنیک مذکور انتقاداتی نظیر چشم‌پوشی از نظرات کارشناسان مختلف و عدم قطعیت در ایده‌های آن‌ها (وانگ و

-
1. FMEA
 2. Severity
 3. Occurrence
 4. Detection

همکارانش^۱، ۲۰۰۹) بر آن وارد است، که با سیستم‌های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارند.

برای رفع مشکلات و ناکارآمدی رویکرد سنتی تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست، تعدادی از محققان از رویکرد فازی برای محاسبه میزان ریسک شکست بهره گرفتند. استفاده از متغیرهای کلامی در این رویکرد به خبرگان اجازه می‌دهد تا مقادیر معنادارتر و ملموس‌تری را به معیارهای سه‌گانه تخصیص دهند و این رویکرد توانست کارآیی روش تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست را بهبود بخشد (کومرا و کومرا^۲، ۲۰۱۳). در همین راستا برخی از محققان به طراحی سیستم‌های استنتاج فازی^۳ پرداختند که ضمن قابلیت ترکیب دانش خبرگان می‌تواند نتایج قابل تفسیری را به کاربران ارائه دهد (اسپاس^۴، ۲۰۰۳).

قابل ذکر است سیستم استنتاج فازی دارای سه رکن مجموعه‌های فازی، قواعد اگر-آنگاه فازی و استدلال فازی است (رفیعی و نمین، ۲۰۱۵) که در آن دریافت ورودی‌ها و انجام استنتاج، براساس مجموعه‌ای از توابع عضویت و قواعد فازی به جای قواعد منطق قطعی و صفر یا یک می‌باشد. درواقع ورودی شامل برخی مفاهیم لفظی مبهم و نادقیق برای یک رویداد خاص بوده و خروجی یک مجموعه‌ی فازی یا مجموعه‌ای دقیق از ویژگی‌های خاص می‌باشد. بخش دیگر سیستم استنتاج فازی موتور استنتاج فازی است که در آن استنتاج مجموعه قواعد فازی بر اساس معیارها و ویژگی‌های خاص صورت می‌گیرد (افیندیگل^۵، ۲۰۰۹). نکته قابل توجه در مطالعاتی که تاکنون با استفاده از سیستم استنتاج فازی انجام پذیرفت آن است که ورودی‌های سیستم استنتاج فازی همان معیارهای اصلی مدل تجزیه و تحلیل حالات بالقوه خطا و اثرات آن بوده‌اند (خشا و همکاران، ۱۳۹۲؛ باتبایر و همکاران^۶، ۲۰۱۶؛ رفیعی و نمین، ۲۰۱۵) این در حالی است که ارزیابی معیارهای شدت خطا، احتمال

-
1. Wang et al
 2. Kumra & Kumra
 3. Fuzzy Inference System
 4. Spath
 5. Efendigil
 6. Batbayar et al

وقوع خطا و احتمال عدم تشخیص صرفاً با یک متغیر و آن نیز به صورت قضاوتی و ذهنی کار دشواری است چرا که هر یک از این معیارها ممکن است با شاخصه‌های فرعی دیگری قابل ارزیابی باشند؛ علاوه بر این، در مطالعات مذکور توجه محققان بر روی شکست‌های ممکن تجهیزات بوده است و توجه کمتری به تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس ریسک شکست تجهیزات داشته‌اند.

از این رو مطالعه حاضر با استناد به موارد فوق، به ارائه مدل جامعی برای استنتاج فازی و تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات با توجه به معیارهای ریسک شکست و حساسیت هر ماشین پرداخته است تا بتواند علاوه بر ایجاد درک روشنی از میزان ریسک شکست تجهیزات، به عنوان راهنمای عملی برای مدیران جهت تعیین استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات قرار بگیرد. در این مطالعه، سعی می‌شود با طراحی سیستم استنتاج فازی چند مرحله‌ای و همچنین بررسی میزان حساسیت به کارگیری هر یک از این تجهیزات به چالش مورد نظر پرداخته شود. قابل ذکر است در ارزیابی میزان حساسیت به کارگیری دستگاه‌ها مشخصه‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرد که نقش مهمی در تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات دارند، اما به عنوان شکست در دستگاه‌ها محسوب نمی‌شوند (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۵). رویکرد مورد اشاره در نیروگاه برق شهید سلیمی نکا به عنوان یکی از مهمترین نیروگاه‌های تولید برق در کشور مورد استفاده قرار گرفت. قابل ذکر است، فقدان استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات می‌تواند مشکلاتی نظیر توقف تولید برق، زیان‌های ناشی از وقفه در کار، تعمیرات کلی و تکراری، افزایش هزینه‌ها و... را به همراه داشته باشد، از این رو ارزیابی ریسک تجهیزات و تعیین استراتژی مناسب برای آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مبانی نظری

تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست ابتدا به عنوان یک متدولوژی طراحی رسمی در دهه ۱۹۶۰ در پروژه‌ی ساخت سفینه آپولوی ۱۱ توسعه یافته است و پس از آن در دهه‌ی ۱۹۷۰ برای مؤسسه‌ی اتمی و در سال ۱۹۹۷ برای صنایع خودروسازی نیز به کار گرفته شد

(داگسویو و همکاران^۱، ۲۰۱۶). در این تکنیک اولویت ریسک شکست دستگاه‌ها براساس حاصل ضرب سه معیار عدم تشخیص خطا، شدت خطا و احتمال وقوع خطا محاسبه می‌شود. اگرچه این تکنیک به طور گسترده و کاربردی توجه صنایع را به خود جلب کرده است اما به دلیل روش محاسبه شاخص اولویت ریسک، همواره مورد انتقاد محققان است (کومرا و کومرا، ۲۰۱۳). که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- فرض بر این است که سه معیار شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا اهمیت نسبی یکسانی دارند. این موضوع منجر به ساده‌سازی بیش از حد این روش می‌شود. در صورتی که در واقعیت درجه اهمیت و وزن این سه معیار می‌تواند متفاوت از یکدیگر باشند ضمن اینکه این معیارها ممکن است تحت تأثیر شاخصه‌های فرعی مختلفی نیز باشند.

۲- ترکیبات مختلف معیارهای شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا می‌توانند مقادیر یکسانی از عدد اولویت ریسک را تولید کنند، در صورتی که حالات شکست با عدد اولویت ریسک یکسان ممکن است مفاهیم خطر کاملاً متفاوتی از یکدیگر داشته باشند.

۳- مقدار عدد اولویت ریسک به خودی خود دارای یک مفهوم غیرشهودی است که سه عامل احتمال عدم تشخیص، شدت خطا و احتمال وقوع خطا را به صورت مستقل در نظر گرفته و روابط غیر مستقیم میان این عوامل را نادیده می‌گیرد (کومرا و کومرا، ۲۰۱۳).

۴- مقادیر معیارهای شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا در تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست اغلب از تجربیات و قضاوت ذهنی خبرگان به دست می‌آید که گاهی به دلیل اشتباهات، تناقض‌ها، نبود قطعیت و ابهام‌های موجود در قضاوت آنان، ارزیابی ریسک با استفاده از این معیارها به درستی انجام نمی‌گیرد (خشا و همکاران، ۱۳۹۲).

در تحقیقات مختلف تلاش قابل توجهی برای غلبه بر کاستی‌های تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست سنتی شده است که یکی از این اقدامات بکارگیری منطق فازی در روش تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست بوده است. مطالعه بولز و پیلائیز^۱ (۱۹۹۵) از جمله اولین تلاش‌ها در این راستا بوده است که برای اولویت‌بندی شکست‌ها، تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست را براساس منطق فازی توسعه دادند؛ ایشان در این مطالعه برای شرح معیارهای اصلی شکست از متغیرهای کلامی فازی و برای برقراری ارتباط میان این معیارها از قواعد اگر-آنگاه فازی استفاده کردند. در ادامه محققان دیگری به استفاده یا توسعه رویکرد مذکور در مسائل مختلف پرداختند (زو و همکاران^۲، ۲۰۰۲؛ پیلائی و وانگ^۳، ۲۰۰۳؛ گویمارائیس و لاپا^۴، ۲۰۰۴؛ یه و هسیه^۵، ۲۰۰۷؛ چین و همکاران^۶، ۲۰۰۸). برخی از محققان دیگر نیز به چالش‌هایی نظیر کاهش تعداد قواعد فازی (تای و لیم^۷، ۲۰۰۶)، تلفیق تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (عبدالجواد و فایک^۸، ۲۰۱۰؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۶؛ ارونراج و میتی^۹، ۲۰۱۰) از طریق به‌کارگیری عملگرهای متفاوت فازی (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹) و همچنین استفاده از فنون هوش مصنوعی نظیر شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی (شارما و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۵؛ گویمارائیس و لاپا^{۱۱}، ۲۰۰۷؛ رفیعی و نمین، ۲۰۱۵؛ اواد و عقیف اسد^{۱۲}، ۲۰۱۶؛ باتبایر و همکاران، ۲۰۱۶) پرداختند. نکته قابل توجه در این تحقیقات، قابلیت بسیار زیاد رویکرد فازی در رویارویی با

-
1. Bowles & Pela'ez
 2. Xu et al
 3. Pillay & Wang
 4. Guimaraes & Lapa
 5. Yeh & Hsieh
 6. Chin et al
 7. Tay & Lim
 8. Abdelgawad & Fayek
 9. Arunraj & Maiti
 10. Sharma et al
 11. Guimaraes & Lapa
 12. Awad & Afif Asad

مسائل دنیای واقعی است که توجه محققان با زمینه‌های تخصصی مختلف را به خود جلب نمود.

در پژوهش حاضر نیز سعی شد از رویکرد فازی برای کاهش کاستی‌های تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست کلاسیک استفاده شود. آنچه این پژوهش را از سایر مطالعات متمایز می‌سازد طراحی سیستم‌های استنتاج چندگانه برای ارزیابی شاخصه‌های فرعی مربوط به معیارهای شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا است. ویژگی متمایز دیگر تحقیق حاضر، بررسی مشخصه‌های مربوط به میزان حساسیت دستگاه‌ها و ترکیب نتایج آن با ارزیابی سیستم استنتاج مذکور برای تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات در نیروگاه برق شهید سلیمی نکا است.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی است و داده‌های اصلی تحقیق با روش میدانی و از طریق خبرگان تحقیق شامل مهندسان بخش نگهداری و تعمیرات با تجربه حداقل ۱۰ سال در نیروگاه برق جمع‌آوری شد. پرسشنامه اول به منظور شناسایی دستگاه‌های مهم و شکست‌های مهم هر یک از آن‌ها با استفاده از روش دلفی ساعتی میان خبرگان توزیع شد به این صورت که ابتدا دستگاه‌ها و سپس شکست‌های مهم، با امتیاز بالاتر از حد آستانه (هفت) انتخاب شدند. از طریق پرسشنامه دوم شاخصه‌های فرعی مورد نظر هر یک از معیارهای تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست ارزیابی شد و به‌عنوان ورودی‌های سیستم استنتاج فازی، مبنای ارزیابی ریسک شکست قرار گرفتند.

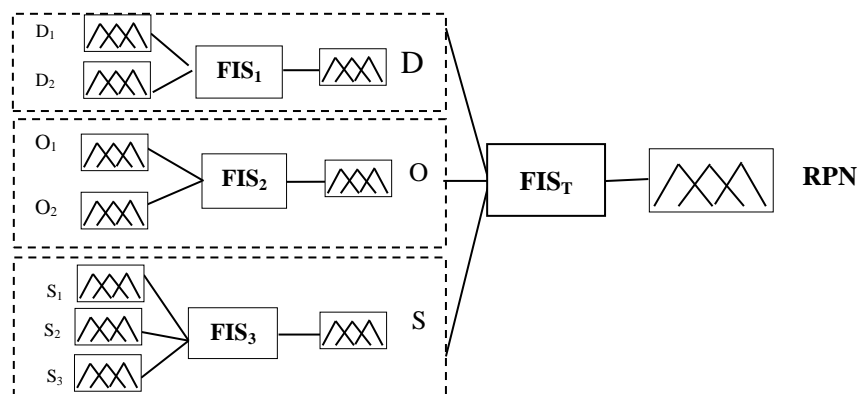
در ادامه برای ارزیابی میزان حساسیت^۱ دستگاه‌ها، مشخصه‌های معرفی شده توسط جمشیدی و همکاران (۲۰۱۵) در اختیار خبرگان قرار گرفت تا با روش دلفی مشخصه‌های مرتبط با مساله تحقیق شناسایی گردد. سپس مشخصه‌های مورد نظر شامل: "سن دستگاه"، "آسیب‌های کار با

دستگاه"، "اثر بخشی جامع تجهیزات^۱" و "الزامات نگهداری" دستگاه‌ها توسط خبرگان ارزیابی شدند. اهمیت ارزیابی مشخصه‌های میزان حساسیت در آن است که مشخصه‌های مذکور را نمی‌توان به‌عنوان معیارها یا شاخصه‌های فرعی ریسک‌های شکست در تحلیل تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست لحاظ کرد، این در حالی است که این مشخصه‌ها تأثیر بسیار زیادی در تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات خواهند داشت.

این پژوهش در سه مرحله اصلی به شرح زیر صورت می‌پذیرد:

مرحله اول: طراحی سیستم استنتاج فازی

در این پژوهش طراحی سیستم استنتاج فازی به صورت چند مرحله‌ای صورت می‌گیرد. برای طراحی این سیستم، سه سیستم استنتاج فرعی و یک سیستم استنتاج نهایی طراحی می‌شود که از معیارهای خروجی سیستم‌های فرعی مذکور به عنوان ورودی سیستم استنتاج نهایی استفاده می‌شود و در نهایت از اطلاعات حاصل از آن برای ارزیابی اولویت ریسک شکست به کار می‌رود. همانطور که در شکل (۱) آمده است برای ارزیابی هر یک از معیارهای تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست یک سیستم استنتاج فازی طراحی می‌شود.



شکل ۱. نمای کلی سیستم استنتاج فازی چند مرحله‌ای

1. Overall Equipment Effectiveness

در ادامه با توجه به مراحل پیاده سازی سیستم استنتاج فازی گام‌های اجرایی تحقیق تشریح می‌گردد.

مراحل پیاده سازی استنتاج فازی به شرح زیر می‌باشد:

۱. تعریف متغیرهای کلامی
۲. ساخت توابع عضویت فازی
۳. ساخت پایگاه اگر-آنگاه فازی
۴. تبدیل داده‌های ورودی به مقادیر فازی با استفاده از توابع عضویت (فازی سازی)
۵. ارزیابی قوانین در پایگاه قواعد فازی (موتور استنتاج فازی)
۶. ترکیب نتایج حاصل از هر قاعده
۷. تبدیل داده‌های خروجی به مقادیر غیر فازی (خشا و همکاران، ۱۳۹۲)

گام اول: طراحی سیستم استنتاج برای معیار "عدم تشخیص" (FIS_1)

در سیستم استنتاج FIS_1 ارزیابی معیار "عدم تشخیص" براساس شاخصه‌های فرعی "احتمال کشف شکست" و "روش‌های مدون کشف شکست" انجام می‌شود. به عبارتی این شاخصه‌های فرعی به عنوان ورودی‌های سیستم استنتاج فازی در نظر گرفته می‌شوند. ارزیابی هر یک از شاخصه‌های مذکور براساس متغیرهای کلامی با توابع عضویت فازی مثلثی انجام می‌پذیرد (جداول ۱، ۲). قابل ذکر است رابطه معیار "عدم تشخیص" و شاخصه‌های فرعی "احتمال کشف شکست" و "روش‌های مدون کشف شکست" به صورت معکوس است، با توجه به این نکته قواعد اگر-آنگاه فازی برای طراحی سیستم استنتاج فازی تعریف می‌گردد تا مرحله بعد مبنای ارزیابی ریسک شکست قرار گیرد.

۱. عدم تشخیص: معیار تشخیص، یعنی احتمال کشف شکست قبل از اینکه رخ دهد. تشخیص شامل دو شاخصه فرعی است: احتمال کشف شکست و روش‌های مدون کشف شکست. در این مطالعه عدم تشخیص مد نظر قرار داده می‌شود بنابراین رابطه‌ی عکسی میان این دو شاخصه فرعی و عدم تشخیص وجود دارد.

۱-۱ احتمال کشف شکست: احتمال کشف شکست به توانایی پرسنل بخش نگهداری و تعمیرات در کشف شکست از طریق بازرسی‌های دوره‌ای و یا مشاهده‌ی بصری و یا به وسیله‌ی کنترل‌های اتوماتیک، هشدارها و حسگرهای دستگاه بستگی دارد (جدول ۱).

جدول ۱. رتبه بندی فازی برای ارزیابی "احتمال کشف شکست"

ارزیابی	توضیح	اعداد فازی
خیلی زیاد (VH)	شکست مشهود است.	(۸,۵, ۱۰, ۱۰)
زیاد (H)	شکست نامشهود است و با دستگاه کمکی یا بازرسی دوره ای قابل شناسایی است.	(۶, ۷,۵, ۹)
متوسط (M)	شکست نامشهود است و فقط با دستگاه‌های کمکی قابل شناسایی است.	(۳,۵, ۵, ۶,۵)
کم (L)	شکست نامشهود است و فقط با بازرسی دوره‌ای قابل شناسایی است.	(۱,۲,۵, ۴)
ناچیز (R)	شکست نامشهود است و امکان تشخیص وجود ندارد.	(۰, ۰, ۱,۵)

۲-۱ روش‌های مدون کشف شکست: این شاخصه فرعی وجود رویه مشخص را در فرآیند بازرسی اندازه می‌گیرد. در جدول (۲) متغیرهای کلامی و مقادیر فازی مورد نظر برای ارزیابی شاخصه‌ی مذکور ارائه شده است.

جدول ۲. درجه بندی فازی برای "روش‌های مدون کشف شکست"

ارزیابی	توضیح	اعداد فازی
خیلی زیاد (VH)	دستگاه صد درصد بازرسی شده و فرایند بازرسی مشخص است.	(۱۰, ۱۰, ۸,۵)
زیاد (H)	بازرسی کامل وجود دارد اما رویه آن نامشخص است.	(۶, ۷,۵, ۹)
متوسط (M)	بازرسی دستی در برخی از اجزای دستگاه انجام می‌شود.	(۵, ۶,۵, ۳,۵)
کم (L)	هیچ فرایند بازرسی وجود ندارد و امکان وقوع خرابی وجود دارد.	(۱, ۲,۵, ۴)
ناچیز (R)	هیچ روند بازرسی شناخته شده برای تشخیص شکست دستگاه وجود ندارد و شکست به سختی قابل تشخیص شود.	(۰, ۰, ۱,۵)

گام دوم: طراحی سیستم استنتاج معیار "احتمال وقوع خطا" (FIS_2)
 برای طراحی سیستم استنتاج معیار "احتمال وقوع خطا" (FIS_2)، از شاخصه‌های فرعی "قابلیت تکرار" و "مشهود بودن" استفاده شده است که ارزیابی این شاخصه‌ها نیز براساس متغیرهای کلامی و اعداد فازی مثلثی ارائه شده در جدول (۳) انجام می‌شود. قواعد مربوط به معیار احتمال وقوع خطا نیز از خبرگان متخصص احصاء و در سیستم استنتاج فازی تعریف می‌شود.

۲. احتمال وقوع خطا: این معیار تکرار شکست یا احتمال وقوع شکست‌ها و ریسک‌های بالقوه برای هر دستگاه را تخمین می‌زند. همانطور که اشاره شده این معیار به منظور محاسبه دقیق احتمالات وقوع به دو شاخصه فرعی نیاز دارد که شامل: قابلیت تکرار و مشهود بودن می‌باشد.
 ۱-۲ قابلیت تکرار: تکرارپذیری یکی از عوامل مهم در معیار احتمال وقوع است. قابلیت تکرار به معنای وقوع خرابی مشابه در یک دوره زمانی برای یک دستگاه یا قسمتی از دستگاه است. به عنوان مثال زمانی که یک شکست در یک دوره زمانی کوتاه رخ دهد (به طور مثال ۳ ماه) درصد تکرارپذیری آن بسیار بالا است اما زمانی که در یک دوره زمانی بلندمدت رخ دهد (به طور مثال ۱۰ سال) درصد قابلیت تکرار آن بسیار پایین است (جدول ۳).
 ۲-۲ مشهود بودن: مشهود بودن شکست، دومین عامل مهم در احتمال وقوع خطا است، که بیانگر آن است که آیا یک شکست برای کارشناسان نگهداری و تعمیرات قابل مشاهده است یا خیر (جدول ۳).

جدول ۳. عبارات کلامی و اعداد فازی برای شاخصه‌های فرعی "احتمال وقوع خطا"

اعداد فازی	(O_2) مشهود بودن	(O_1) قابلیت تکرار	ارزیابی
	زمان تشخیص	زمان	
(۸/۵، ۱۰، ۱۰)	به هیچ وجه قابل رویت نیست	شکست‌های مشابه در بازه ۳ماه	خیلی زیاد (VH)
(۶، ۷/۵، ۹)	قابل مشاهده با استفاده از دستگاه	شکست‌های مشابه در بازه ۳-۶ماه	زیاد (H)
(۳/۵، ۵، ۶/۵)	قابل مشاهده بین فواصل دو	شکست‌های مشابه در بازه ۶-	متوسط (M)
(۱، ۲/۵، ۴)	قابل مشاهده هنگام بازرسی	شکست‌های مشابه در بازه ۲-۱۰	کم (L)
(۰، ۰، ۱/۵)	قابل مشاهده قبل از بازرسی	عدم وقوع بیش از ۱۰ سال	ناچیز (R)

گام سوم: طراحی سیستم استنتاج شدت خطا (FIS_3)

برای در نظر گرفتن همه تبعات ناشی از هر شکست، باید همه تأثیرات بالقوه آن بر سیستم مدنظر قرار گیرد. لذا با ارزیابی شاخصه‌های فرعی "تأثیر روی نیروی کار"، "میانگین زمان برای تعمیر" و "ضرر اقتصادی"، می‌توان ارزیابی دقیق‌تری را از معیار "شدت خطا" ارائه کرد. از این رو با استفاده از این شاخصه‌ها سیستم استنتاج فازی معیار شدت خطا طراحی می‌شود. متغیرهای کلامی و اعداد فازی شاخصه‌های فرعی این معیار در جدول (۴) آمده است.

۳-۱- تأثیر بر روی نیروی کار (S_1): یک شکست بالقوه یا نقص در دستگاه می‌تواند منجر به آسیب و خرابی دائمی شده و یا حتی مرگ را برای کاربران دستگاه یا پرسنل بخش نگهداری و تعمیرات به دنبال داشته باشد (جدول ۴).

۳-۲- میانگین زمان برای تعمیر (S_2): میانگین زمان برای تعمیر یکی از متداول‌ترین شاخصه‌های به کار برده شده در تعمیر و نگهداری دستگاه‌ها است که بیانگر متوسط زمان مورد نیاز برای انجام نگهداری اصلاحی در دستگاه‌ها یا تجهیزات می‌باشد (جدول ۴).

۳-۳- ضرر اقتصادی (S_3): وانگ و همکارانش (۲۰۱۲) ضرر اقتصادی در سازمان‌ها را به عنوان ترکیبی از هزینه‌های نگهداری^۱، و زمان از دست رفته‌ی مرتبط با تأخیر^۲ تعریف کردند. هزینه‌های نگهداری (عوارض ناشی از نقص یا شکست در دستگاه‌ها و تجهیزات) شامل هزینه‌های ثابت (مانند هزینه قطعات یدکی) و هزینه‌های متغیر (مانند هزینه کارشناسان نگهداری) است (جدول ۴).

سطوح مختلف ضررهای اقتصادی و متغیرهای کلامی و اعداد فازی مرتبط با آن در جدول (۴) شرح داده شده است.

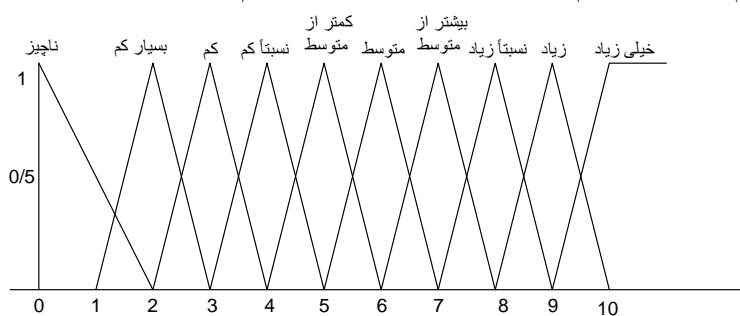
-
1. Maintenance Cost
 2. Delaying Treatment

جدول ۴. سطوح مختلف نتایج حاصل از خرابی و اعداد فازی متناظر با آن‌ها

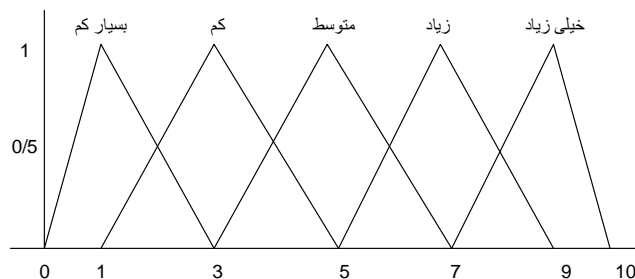
سطح	S1 (اثر روی نیروی کار)	S2 (میانگین زمان برای تعمیر)	S3 (ضرر اقتصادی، میلیون ریال)	اعداد فازی
خیلی زیاد (VH)	مرگ	عدم امکان تعمیر	$100 > \text{زیان}$	(۸/۵، ۱۰، ۱۰)
زیاد (H)	آسیب عمیق طولانی مدت	تعمیر بیش از چهار روز	$50 < \text{زیان} < 100$	(۶، ۷/۵، ۹)
متوسط (M)	آسیب متوسط	تعمیر بین یک تا چهار روز	$20 < \text{زیان} < 50$	(۳/۵، ۵، ۶/۵)
کم (L)	آسیب یا بیماری جزئی	تعمیر یک ساعت تا یک روز	$5 < \text{زیان} < 20$	(۱، ۲/۵، ۴)
ناچیز (R)	بدون تاثیر	تعمیر کمتر از یک ساعت	$0 < \text{زیان} < 5$	(۰، ۱/۵، ۰)

گام چهارم: طراحی سیستم استنتاج کل (FIS_T)

در این گام سیستم استنتاج کل برای ارزیابی ریسک شکست، با توجه به خروجی گام‌های قبل طراحی می‌شود. به این ترتیب که قواعد مربوط به روابط میان معیارهای شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا با عدد اولویت ریسک (ریسک شکست) براساس عبارات کلامی و طیف‌های فازی مندرج در جدول (۲) و (۳) از خبرگان تحقیق احصاء و در سیستم استنتاج کل تعریف می‌گردد. قابل ذکر است خروجی‌های هر یک از سیستم‌های استنتاج فرعی (گام‌های اول تا سوم) به عنوان ورودی‌های این سیستم خواهند بود.



شکل ۲. توابع عضویت مجموعه فازی مربوط به عدد اولویت ریسک



شکل ۳. توابع عضویت مجموعه فازی مربوط به شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا

مرحله دوم: ارزیابی میزان حساسیت دستگاهها

ارزیابی میزان حساسیت هر دستگاه، فارغ از میزان ریسک شکست آن، برای تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات دستگاه‌ها ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. لذا، توجه به چهار مشخصه مهم حساسیت دستگاه شامل: سن، آسیب‌های کار با دستگاه، اثر بخشی جامع تجهیزات و الزامات نگهداری که در چهارچوب معیارها و شاخصه‌های فرعی تحلیل شکست در تکنیک تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست قرار نمی‌گیرند، بسیار ضروری است. برای این منظور وزن هریک از مشخصه‌ها با نظر خبرگان متخصص و بر اساس مقایسات زوجی چانگ^۱ (۱۹۹۶) تعیین می‌شود سپس با توجه به ارزیابی خبرگان از میزان حساسیت جزئی هر مشخصه در هریک از دستگاه‌ها، مقدار حساسیت کل^۲ محاسبه می‌شود. در ادامه چگونگی ارزیابی حساسیت جزئی در هریک از مشخصه‌ها با توجه به مطالعات جمشیدی و همکاران (۲۰۱۵) آمده است. قابل ذکر است روایی طیف‌های مندرج در جدول مذکور مورد تأیید خبرگان متخصص این تحقیق بوده است.

۱. سن دستگاه: هریک از دستگاه‌ها در دوران متفاوت عمر خود از درصد شکست متفاوتی برخوردارند، در ابتدای دوره عمر دستگاه که دوران طفولیت نامیده می‌شود تعداد شکست و نقص در دستگاه روند رو به کاهشی دارد (شکست در دستگاه به علت عدم آشنایی اپراتور با

1. Chang

2. Total Intensity

دستگاه رخ می‌دهد) در دوره دوم که دوران عمر مفید دستگاه است میزان شکست ثابت است و در دوران فرسودگی که سومین مرحله از عمر دستگاه می‌باشد میزان شکست در اثر استفاده طولانی مدت از آن دستگاه بالا است. در جدول (۵) حساسیت جزئی دستگاه‌ها در دوران متفاوت عمر ارائه شده است.

جدول ۵. میزان حساسیت برای مشخصه سن دستگاه

توضیحات	حساسیت
دوره کارکرد کم	۰-٪۱۵
دوره عمر مفید	۱۵-٪۷۰
دوره فرسودگی	۷۰-٪۱۰۰

۲. آسیب‌های کار با دستگاه: آسیب‌های حین کار با دستگاه یک مسئله جدی اما رایج است که غالباً ناشی از پیچیدگی دستگاه‌ها یا عدم آموزش کافی کاربر می‌باشد. در جدول (۶) متغیرهای کلامی مربوط به سطوح مختلف خطرات ناشی از به کارگیری و سطح حساسیت آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۶. ارزیابی آسیب‌های کار با دستگاه

سطح ریسک	خطرات	حساسیت
بسیار زیاد	آسیب بسیار مخرب	٪۱۰۰
زیاد	آسیب مخرب	۷۰-٪۹۰
متوسط	آسیب متوسط	۴۰-٪۷۰
کم	آسیب کم	۱۰-٪۴۰
خیلی کم	آسیب بسیار کم	<٪۱۰

۳. اثر بخشی جامع تجهیزات^۱: اثر بخشی جامع تجهیزات یک ابزار اندازه‌گیری جامع می‌باشد که از حاصل ضرب سه عامل در دسترس بودن^۲، عملکرد^۳ و کیفیت^۴ بدست می‌آید و هدف بر

-
1. Overall Equipment Effectiveness
 2. Availability
 3. Performance
 4. Quality

آن است که زیان‌های ناشی از اتلاف زمان تولید شامل توقف ماشین‌آلات، کاهش سرعت تولید و ضایعات کاهش یابد.

(عملکرد* کیفیت* در دسترس بودن) = اثر بخشی جامع تجهیزات

جدول ۷. حساسیت مرتبط با مقدار اثر بخشی جامع تجهیزات

OEE	حساسیت
$0 < OEE < 0.5$	۷۰-٪۱۰۰
$0.5 < OEE < 0.7$	۲۰-٪۷۰
$0.7 < OEE$	۱۰-٪۲۰

۴. الزامات نگهداری: هر دستگاه، الزامات نگهداری خاص خود را دارد که برای تحقق آن از ابزار، مواد و مهارت‌های مختلفی استفاده می‌شود (جدول ۸). الزامات نگهداری برای هر دستگاه در سه سطح بالا، متوسط، پایین تعیین می‌شود.

حساسیت الزامات نگهداری کل از حاصل ضرب امتیازات سه عامل ابزار، مواد و مهارت‌های نگهداری بدست می‌آید. از آن جایی که این مقادیر احتمالی نیستند از این رو با تقسیم حساسیت الزامات نگهداری کل به مجموع امتیازات تعیین شده (نرم ساعتی) توسط هر خبره نرمالایز می‌شود.

جدول ۸. ارزیابی و امتیازات مربوط به الزامات نگهداری

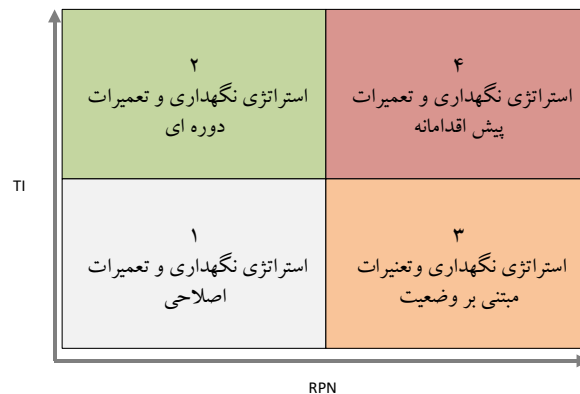
امتیاز	مهارت‌های نگهداری	امتیاز	مواد نگهداری	امتیاز	ابزار نگهداری
۱	بدون نیاز به مهارت‌های خاص	۱	بدون نیاز به مواد خاص	۱	ابزار عمومی (جایگزین چندگانه دارند)
۲	مهارت متوسط	۲	مواد خاص	۲	ابزار عمومی (بدون جایگزین)
۳	مهارت بالا			۳	ابزار خاص

مرحله سوم: تعیین استراتژی

در مرحله نهایی پس از محاسبه‌ی عدد اولویت ریسک و حساسیت کل، استراتژی مناسب برای هر دستگاه تعیین می‌شود. معمولاً استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر

دستگاه بر مبنای منابع مورد نیازشان مانند نیروی کار و همچنین تأثیرشان بر روی نگهداری و تعمیرات طبقه بندی می‌شوند.

به منظور شناسایی استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات برای هر یک از دستگاه‌ها از نمودار شاخص اولویت ریسک-حساسیت کل استفاده می‌شود که محور افقی نمودار، شاخص اولویت ریسک و محور عمودی آن شاخص حساسیت کل می‌باشد. با توجه به مقادیر مختلف شاخص‌های اولویت ریسک و حساسیت کل استراتژی‌های مختلف نگهداری و تعمیرات تعیین می‌شود (نمودار ۱).



نمودار ۱. تعیین استراتژی‌های نت بر اساس شاخص‌های اولویت ریسک-حساسیت کل

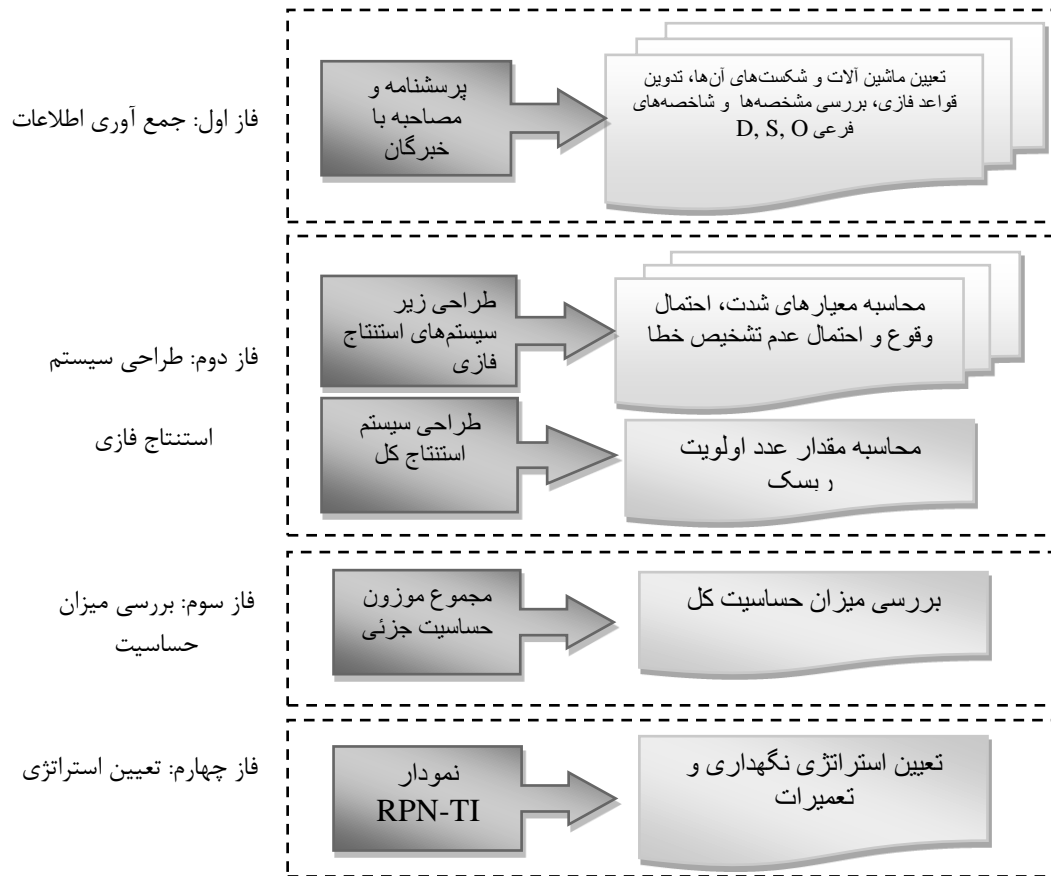
۱. تعمیر و نگهداری اصلاحی: با توجه به نمودار فوق، در ربع اول (چپ-پایین) مقدار شاخص‌های حساسیت کل و اولویت ریسک مربوط به دستگاه مورد نظر کمتر از حد آستانه است و دستگاه‌ها دارای اولویت بسیار پایین هستند. در این شرایط استراتژی تعمیر و نگهداری، بعد از وقوع یک شکست در دستگاه یا تجهیزات به کار برده می‌شود.

۲. تعمیر و نگهداری دوره ای: در ربع دوم (چپ-بالا) میزان حساسیت کل بالاتر از حد آستانه و عدد اولویت ریسک پایین‌تر از حد آستانه است و دستگاه‌ها دارای اولویت پایین هستند. در این صورت استراتژی تعمیر و نگهداری به صورت دوره‌ای (بازه‌های زمانی مشخص مثلاً دوره‌های سه ماهه یا شش ماهه) به منظور کاهش شکست‌ها به کار برده می‌شوند.

۳. تعمیر و نگهداری مبتنی بر وضعیت: در ربع سوم (راست-پایین) مقدار شاخص شاخص اولویت ریسک بالاتر و حساسیت کل پایین تر از حد آستانه می باشد. دستگاه‌ها در این شرایط دارای اولویت بالا هستند که استراتژی نگهداری و تعمیرات بر طبق اطلاعات بدست آمده از مجموعه‌ای از حسگرهای سیستم و بعضی شاخصه‌ها مانند مشاهده لرزش، آنالیز روغن دستگاه و تحلیل صدای دستگاه صورت می گیرد. تعمیر و نگهداری مبتنی بر وضعیت از اطلاعات واقعی جهت تعمیر دستگاه‌ها بهره می برد.

۴. تعمیر و نگهداری پیش اقدامانه: در ربع چهارم (راست-بالا) میزان شاخص اولویت ریسک و حساسیت کل هر دو بالاتر از حد آستانه می باشد و دستگاه‌ها دارای اولویت بسیار بالا هستند بنابراین بسیار حیاتی به شمار می روند. در تعمیر و نگهداری پیش اقدامانه علت شکست دستگاه از طریق تحلیل علت ریشه‌ای خرابی، تحلیل قطعه از کار افتاده و... شناسایی شده و با اجرای فرآیندهایی نظیر بازطراحی و نصب مجدد، اقداماتی در جهت حذف و یا تعدیل آنها صورت می گیرد.

با توجه به مراحل که در بالا بیان شده فرآیند تحقیق حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. فرآیند پژوهش حاضر

یافته‌های پژوهش

در ابتدا با استفاده از نظر خبرگان ۵ مورد از دستگاه‌های با اهمیت نیروگاه تعیین و شکست‌های مربوط به هر یک از آن‌ها شناسایی شدند که در جدول (۹) آمده است.

جدول ۹. دستگاه‌ها و شکست‌های مربوط به هر یک از آن‌ها

ردیف	نام تجهیزات	نوع شکست
۱	ژنراتور	(۱) ترک خوردگی و نشی آب از لوله‌های استاتور (۲) بالا رفتن دمای بایت یاتاقان (۳) کم شدن فشار هیدروژن (۴) نشی روغن از یاتاقان‌ها (۵) ارتعاش در یاتاقان‌ها
۲	کندانسور توربین	(۱) اشکال در نازل‌های خلاگیری (۲) زیاد شدن آمار لوله‌های بلاک شده (۳) افت سطح آب دریا در واتر باکس (۴) نشی لوله‌های کندانسور (۵) افت خلا کندانسور
۳	اف دی فن	(۱) تغییر بالانس پرها (۲) خوردگی اسلایدینگ بلوک (۳) خرابی هیدرولیک (۴) نشی روغن‌ها (۵) شکستن پرها
۴	الکتروموتور آب سرویس اصلی	(۱) خرابی ترمینال الکتروموتور (۲) از بین رفتن لاستیک کویلینگ (۳) خرابی بوش نگهدارنده بلبرینگ (۴) خرابی رول برینگ (۵) خرابی بلبرینگ

خرابی گیربکس نازل‌های بسکت	(۱)	ایر پری هیتر	۵
خرابی نازل‌های شست و شوی بسکت	(۲)		
خرابی گیربکس	(۳)		
خرابی لوله استیل	(۴)		
خرابی لوله لنت تیوپ	(۵)		

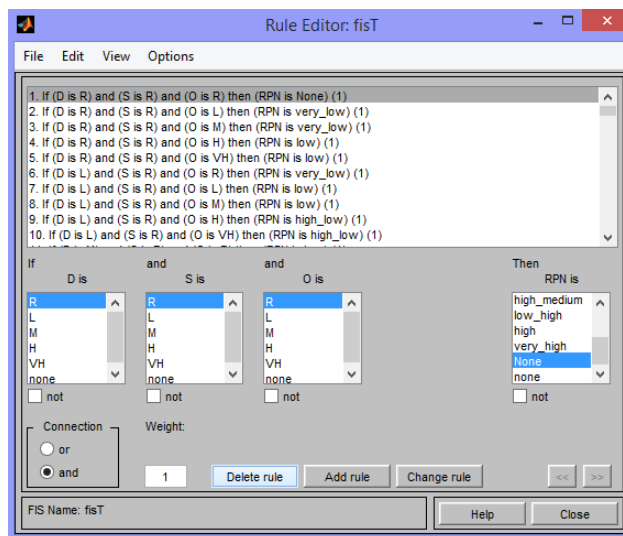
به منظور طراحی یک سیستم خبره فازی برای ارزیابی ریسک شکست‌ها، در ابتدا سه زیر سیستم استنتاج فازی برای هر یک از معیارهای معیارهای شدت، احتمال وقوع و احتمال عدم تشخیص خطا و سپس سیستم استنتاج کل برای ارزیابی شاخص اولویت ریسک طراحی شد. قابل ذکر است نتایج هر یک از زیر سیستم‌ها به عنوان ورودی سیستم استنتاج کل مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت سیستم استنتاج در هر مرحله تعداد قواعد بر اساس تعداد توابع عضویت و تعداد ورودی‌های هر سیستم تعیین می‌گردد که در جدول (۱۰) تعداد قواعد تعریف شده در سیستم‌های استنتاج فازی آمده است.

جدول ۱۰. تعداد قواعد فازی در سیستم‌های استنتاج فازی

معیارهای اصلی	زیر معیار	تعداد قواعد در مدل استنتاج فازی
		زیر سیستم‌ها
تشخیص (D)	احتمال عدم تشخیص (D_1) روش تشخیص شکست (D_1)	$FIS_1 (5 \times 5 = 25)$
احتمال وقوع (O)	تکرار پذیری (O_1) مشهود بودن (O_2)	$FIS_2 (5 \times 5 = 25)$
شدت شکست (S)	اثر روی نیروی کار (S_1) میانگین زمان برای تعمیر (S_2) ضرر اقتصادی (S_3)	$FIS_2 (5 \times 5 = 25)$

در شکل (۵) تعدادی از قواعد تعریف شده در سیستم استنتاج فازی کل (ارزیابی عدد اولویت ریسک) در نرم افزار متلب نشان داده شده است.

1. Severity



شکل ۵. قواعد مربوط به سیستم استنتاج کل

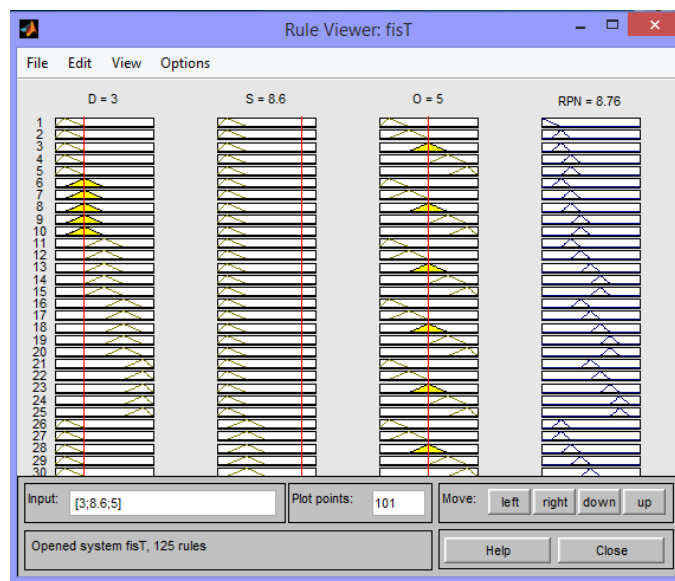
پس از طراحی مدل سیستم استنتاج فازی چند مرحله‌ای، مدل مذکور برای ارزیابی ریسک شکست‌های ماشین‌آلات در نیروگاه به کار گرفته شد. بدین منظور ابتدا وضعیت هر یک از شکست‌ها با توجه به طیف‌های مندرج در جداول ۱ تا ۴ توسط خیرگان ارزیابی شدند که تلفیق نظرات ایشان در جدول (۱۱) آمده است.

جدول ۱۱. تلفیق اعداد فازی مربوط به نظرات خبرگان

تجهیزات	شکست	تشخیص (D)		وقوع (O)		شدت (S)		
		D1	D2	O1	O2	S1	S2	S3
ژنراتور	کم شدن فشار هیدروژن	(۳,۵۵,۵۶,۵)	(۷,۶۹,۱۶,۹,۶۷)	(۴,۳۳,۵,۸۳,۷,۳۳)	(۶,۷,۵,۹)	(۰,۳۳,۰,۸۳,۲,۳۳)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۳,۱۶,۰,۶۶,۱,۶۶)
	ترک خوردگی و نشئی آب از لوله‌های استاتور	(۵,۱۶,۶,۶۶,۷,۶۷)	(۶,۷,۵,۸,۵)	(۰,۳۳,۰,۸۳,۲,۳۳)	(۱,۲,۵,۴)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۶,۷,۵,۹)	(۸,۵,۱۰,۱۰)
	بالا رفتن دمای بایت یاتاقان	(۵,۱۶,۶,۶۶,۷,۶۶)	(۶,۷,۵,۸)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)	(۴,۵,۶,۵)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۴,۸۳,۱,۸۳,۳,۳۳)	(۰,۶۶,۱,۶۶,۳,۱۶)
	نشئی روغن از یاتاقان	(۴,۳۳,۵,۸۳,۶,۸۳)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۷,۶۶)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۱,۸۳,۳,۳۳,۴,۸۳)	(۱,۵,۲,۵,۴)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)
	ارتعاش در یاتاقان	(۱,۵,۲,۵,۴)	(۶,۷,۵,۸)	(۱,۲,۵,۴)	(۴,۵,۶,۵)	(۰,۳۳,۰,۸۳,۲,۳۳)	(۴,۳۳,۵,۸۳,۷,۳۳)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)
	اشکال در نازل‌های خلاگیری	(۴,۳۳,۵,۸۳,۷,۳۳)	(۶,۸۳,۸,۳۳,۹,۳۳)	(۳,۵,۵,۶,۵)	(۴,۳۳,۵,۸۳,۷,۳۳)	(۰,۳۳,۰,۸۳,۲,۳۳)	(۳,۵,۵,۶,۵)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)
کندانسور توربین	زیاد شدن آمار لوله‌های بلاک شده	(۸,۵,۱۰,۱۰)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۱,۸۳,۳,۳۳,۴,۸۳)	(۳,۳۳,۴,۸۳,۱,۸۳)	(۱,۵,۲,۵,۴)	(۶,۷,۵,۹)	(۷,۶۶,۹,۱۶,۹,۶۶)
	افت سطح آب دریا	(۶,۸۳,۸,۳۳,۸,۸۳)	(۱,۲,۵,۴)	(۷,۶۶,۹,۱۶,۹,۶۶)	(۴,۳۳,۵,۸۳,۷,۳۳)	(۰,۰,۰,۱,۵)	(۶,۷,۵,۸)	(۱,۲,۵,۴)
	نشئی لوله کندانسور	(۱,۸۳,۳,۳۳,۴,۸۳)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)	(۳,۵,۵,۶,۵)	(۴,۳۳,۵,۸۳,۷,۳۳)	(۱,۵,۲,۵,۴)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)
	افت خلأ کندانسور	(۳,۵,۵,۶,۵)	(۶,۸۳,۸,۳۳,۹,۳۳)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)	(۶,۷,۵,۹)	(۱,۱۶,۱,۶۶,۳,۱۶)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)
اف دی فن	خوردگی اسلایدینگ بلوک	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۲,۶۶,۴,۱۶,۵,۶۶)	(۱,۵,۲,۵,۴)	(۱,۲,۵,۴)	(۰,۳۳,۰,۸۳,۲,۳۳)	(۶,۷,۵,۸,۵)	(۷,۶۶,۹,۱۶,۹,۶۶)
	نشئی	(۶,۷,۵,۸)	(۶,۷,۵,۸,۵)	(۱,۸۳,۳,۳۳,۴,۸۳)	(۰,۶۶,۱,۶۶,۳,۱۶)	(۱,۵,۲,۵,۴)	(۶,۷,۵,۹)	(۵,۱۶,۶,۶۶,۸,۱۶)

							روغن ها	
(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۰,۶۶۱,۶۶۳,۱۶)	(۳,۱۶۴,۱۶۵,۶۶)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۶,۷,۵۵۸)	(۳,۵۵۶,۶۵)	تغییر بالانس پره ها	
(۶,۷,۵۵۸,۵)	(۲,۶۶۴,۱۶۵,۶۶)	(۱,۱۶۱,۶۶۳,۱۶)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۱,۸۳۳,۳۳۴,۸۳)	(۶,۷,۵۵۸)	(۱,۸۳۳,۳۳۴,۸۳)	خرابی هیدرولیک	
(۷,۶۶۹,۱۶۹,۶۶)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۱,۵۲,۵۴)	(۰,۰,۱,۵)	(۱,۲,۵۴)	(۶,۷,۵۵۸)	(۶,۸۳۸,۳۳۹,۳۳)	شکست پره ها	
(۷,۶۶۹,۱۶۹,۶۶)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۰,۰,۱,۵)	(۲,۲,۵۴)	(۱,۲,۵۴)	(۶,۸۳۸,۳۳۹,۳۳)	(۶,۷,۵۵۹)	خرابی ترمینال الکتروموتور	
(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۰,۰,۱,۵)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۳,۱۶۴,۱۶۵,۶۶)	(۵,۱۶۶,۶۶۷,۶۶)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	خرابی رول برینگ	الکتروموتور آب سرویس اصلی
(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۰,۰,۱,۵)	(۵,۱۶۶,۶۶۷,۶۶)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۳,۵۵۶,۶۵)	خرابی بلبرینگ	
(۶,۷,۵۵۹)	(۵,۱۶۶,۶۶۸,۱۶)	(۰,۰,۱,۵)	(۱,۲,۵۴)	(۴,۵,۶)	(۲,۶۶۴,۱۶۵,۶۶)	(۲,۶۶۴,۱۶۵,۶۶)	خرابی بوش نگهدارنده بلبرینگ	
(۶,۸۳۸,۳۳۹,۳۳)	(۶,۷,۵۵۹)	(۰,۳۳۰,۸۳۲,۳۳)	(۰,۳۳۰,۸۳۲,۳۳)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۱,۵۲,۵۴)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	از بین رفتن لاستیک کوپلینگ	
(۶,۷,۵۵۸)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۰,۶۶۱,۶۶۳,۱۶)	(۲,۳۳۳,۳۳۴,۸۳)	(۱,۸۳۳,۳۳۴,۸۳)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	خرابی گیربکس	ایر پری هیتر
(۶,۷,۵۵۸,۵)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۰,۶۶۱,۶۶۳,۱۶)	(۲,۶۶۴,۱۶۵,۶۶)	(۱,۲,۵۴)	(۶,۷,۵۵۸,۵)	(۵,۱۶۶,۶۶۷,۶۶)	خرابی گیربکس نازل های بسکت	
(۶,۷,۵۵۸,۵)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۱,۵۲,۵۴)	(۱,۸۳۳,۳۳۴,۸۳)	(۱,۲,۵۴)	(۲,۶۶۴,۱۶۵,۶۶)	(۱,۸۳۳,۳۳۴,۸۳)	خرابی لوله استیل	
(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۳,۵۵۶,۶۵)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	خرابی نازل های شست و شوی بسکت	
(۷,۶۶۹,۱۶۹,۶۶)	(۶,۷,۵۵۹)	(۱,۸۳۳,۳۳۴,۸۳)	(۴,۳۳۵,۸۳۷,۳۳)	(۲,۳۳۳,۳۳۴,۸۳)	(۶,۸۳۸,۳۳۹,۳۳)	(۲,۶۶۴,۱۶۵,۶۶)	خرابی لوله لنت تیوپ	

ارزیابی خبرگان از وضعیت هر یک از شکست‌ها پس از قطعی‌سازی، به عنوان مقادیر ورودی زیر سیستم‌ها وارد مدل‌های استنتاج مربوط به معیارهای سه‌گانه شدت، وقوع و عدم تشخیص شدند، سپس مقادیر خروجی هر یک از این زیرسیستم‌ها به عنوان ورودی در سیستم استنتاج کل به کار گرفته شد. در شکل ۶ نمای مربوطه به ارزیابی قواعد (استلزام) و همچنین ترکیب نتایج حاصل از بررسی تمام قواعد (استنتاج) مربوط به سیستم استنتاج کلی، در مورد شکست پنجم دستگاه کندانسور توربین نشان داده شده است.



شکل ۶. نمای مربوط به قواعد تعریف شده در سیستم استنتاج کل

مقادیر خروجی سیستم استنتاج کل (مقدار قطعی شده عدد اولویت ریسک با روش مرکز ثقل) برای شکست‌های هر یک از دستگاه‌ها در جدول (۱۲) نشان داده شد. در نهایت به منظور تعیین ریسک شکست در هر دستگاه، میانگین مقادیر عدد اولویت ریسک شکست‌های مختلف هر دستگاه محاسبه شده است که در جدول (۱۳) آمده است.

جدول ۱۲. مقدار عدد اولویت ریسک مربوط به هر یک از شکست‌ها

اولویت	عدد اولویت ریسک	نوع شکست	نام تجهیزات	ردیف
۱۵	۴,۸۹	کم شدن فشار هیدروژن	ژنراتور	۱
۹	۷,۳۹	ترک خوردگی و نشی آب از لوله‌های استاتور		
۱۶	۴,۵۶	بالا رفتن دمای بایت یاتاقان		
۶	۸	نشی روغن از یاتاقان‌ها		
۶	۸	ارتعاش در یاتاقان‌ها		
۱۴	۶	اشکال در نازل‌های خلاگیری	کندانسور توربین	۲
۸	۷,۴۱	زیاد شدن آمار لوله‌های بلاک شده		
۵	۸,۳۶	افت سطح آب دریا در واتر باکس		
۱	۸,۷۶	نشی لوله کندانسور		
۱۱	۷	افت خلأ کندانسور		
۳	۸,۴۳	خوردگی اسلایدینگ بلوک	اف دی فن	۳
۷	۷,۴۴	نش روغن		
۱۴	۶	تغییر بالانس پرها		
۶	۸	خرابی هیدرولیک		
۱۳	۶,۲۲	شکست پرها		
۱۲	۶,۲۳	خرابی ترمینال الکتروموتور	الکتروموتور آب سرویس اصلی	۴
۱۴	۶	خرابی رول برینگ		
۱۱	۷	خرابی بلبرینگ		
۱	۸,۷۶	خرابی بوش نگهدارنده بلبرینگ		
۴	۸,۴۲	از بین رفتن لاستیک کوپلینگ		
۱۱	۷	خرابی گیربکس	ایر پری هیتر	۵
۱۰	۷,۲۵	خرابی گیر بکس نازل‌های بسکت		
۱۱	۷	خرابی لوله استیل		
۱۴	۶	خرابی نازل‌های شست و شوی بسکت		
۲	۸,۷۴	خرابی لوله لنت تیوپ		

جدول ۱۳. مقدار اولویت ریسک مربوط به هر دستگاه

شماره	دستگاه	عدد اولویت ریسک	رتبه
۱	ژنراتور	۶,۵۶	۵
۲	کندانسور توربین	۷,۵۰	۱
۳	اف دی فن	۷,۲۱	۳
۴	الکتروموتور آب سرویس اصلی	۷,۲۸	۲
۵	ایر پری هیتر	۷,۱۹	۴

با توجه به توضیحات بخش روش شناسی پژوهش (مرحله دوم) برای محاسبه میزان حساسیت دستگاه‌ها لازم است وزن هر یک از مشخصه‌های مربوط به میزان حساسیت ارزیابی شود. نتایج این ارزیابی براساس روش مقایسات زوجی چانگک در جدول (۱۴) ارائه شده است.

جدول ۱۴. وزن هر یک از مشخصه‌های مربوط به دستگاه

بعد	سن دستگاه	آسیب‌های کار با دستگاه	در دسترس بودن	الزامات نگهداری
وزن	۰,۰۸	۰,۱۷	۰,۴۶	۰,۲۸

در جدول (۱۵) ارزیابی خبرگان از هر یک از ابعاد چهارگانه حساسیت دستگاه‌ها ارائه شده است. قابل ذکر است الزامات نگهداری براساس سه شاخصه فرعی ابزار، مواد و مهارت ارزیابی شد (ستون ۷) سپس با توجه به ضرورت هماهنگی طیف ابعاد با یکدیگر، نتایج مورد نظر نرمال سازی شده است (ستون ۸).

جدول ۱۵. مقدار حساسیت جزئی هر دستگاه

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
دستگاه	خبره	سن دستگاه	آسیب‌های کار با دستگاه	در دسترس بودن	الزامات نگهداری		
					ابزار	مواد	مهارت
ژنراتور	۱	%۵۰	%۴۵	%۷۰	۳	۲	۳
	۲	%۶۵	%۲۰	%۸۰	۳	۱	۳
	۳	%۵۰	%۳۰	%۸۵	۳	۲	۳
الزامات نگهداری نرمال شده	الزامات نگهداری کل						
	۱۸						۰,۴
	۹						۰,۲
	۱۸						۰,۴

۰,۳	۹	۳	۱	۳	%۲۵	%۴۵	%۱۲	۱	کندانسور توربین
۰,۳	۹	۳	۱	۳	%۵۵	%۲۵	%۵۰	۲	
۰,۳	۹	۳	۱	۳	%۷۰	%۲۰	%۴۰	۳	
۰,۶۹	۹	۳	۱	۳	%۳۰	%۴۰	%۲۰	۱	اف دی فن
۰,۱۵	۲	۲	۱	۱	%۳۰	%۴۵	%۱۲	۲	
۰,۱۵	۲	۲	۱	۱	%۶۰	%۴۵	%۱۵	۳	
۰,۳۷۵	۶	۲	۱	۳	%۲۰	%۱۰	%۴۰	۱	الکتروموتور آب سرویس اصلی
۰,۳۷۵	۶	۳	۲	۱	%۱۵	%۳۰	%۳۰	۲	
۰,۲۵	۴	۲	۲	۱	%۵۵	%۲۰	%۳۰	۳	
۰,۶	۱۸	۳	۲	۳	%۶۰	%۷۰	%۵۰	۱	ایر پری هیتر
۰,۱	۳	۳	۱	۱	%۲۵	%۵۰	%۴۰	۲	
۰,۲	۶	۲	۱	۳	%۴۵	%۵۰	%۳۵	۳	

برای محاسبه میزان حساسیت جزئی هر دستگاه متوسط نظرات خبره‌ها در خصوص هر یک از ویژگی‌ها را در وزن مربوط به آن ویژگی ضرب می‌کنیم. برای نمونه میزان حساسیت جزئی مشخصه سن دستگاه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{0.5 + 0.65 + 0.5}{3} \times 0.08 = 0.044$$

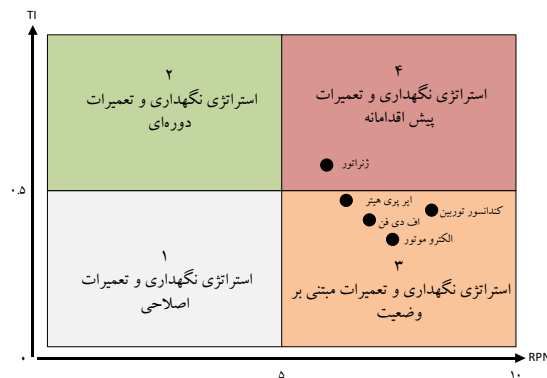
مقدار حساسیت کل هر دستگاه نیز از مجموع موزون حساسیت جزئی مشخصه‌های آنها محاسبه می‌شود که مقادیر مربوط به آن در جدول (۱۶) آمده است.

جدول ۱۶. میزان حساسیت کل هر یک از دستگاه‌ها

رتبه	شاخص حساسیت کل	الزامات نگهداری	در دسترس بودن	آسیب‌های کار با دستگاه	سن دستگاه	مشخصه‌ها
		۰,۲۸	۰,۴۶	۰,۱۷	۰,۰۸	وزن دستگاه
۱	۰,۵۵	۰,۰۹۳	۰,۳۶	۰,۰۵	۰,۰۴۴	ژنراتور
۳	۰,۴۰	۰,۰۹۳	۰,۲۳	۰,۰۵	۰,۰۲۷	کندانسور توربین

۴	۰,۳۶	۰,۰۹۳	۰,۱۸	۰,۰۷	۰,۰۱۲	اف دی فن
۵	۰,۲۹	۰,۰۹۳	۰,۱۳	۰,۰۳	۰,۰۲	الکترو موتور
۲	۰,۴۲	۰,۰۹	۰,۱۹	۰,۰۹	۰,۰۳	ایر پری هیتز

بر اساس یافته‌های مرحله اول (عدد اولویت ریسک) و مرحله دوم (حساسیت کل) موقعیت هر دستگاه از نظر ریسک و حساسیت در نمودار عدد اولویت ریسک-حساسیت کل مشخص می‌شود (نمودار ۲). هر یک از ابعاد نمودار مذکور معرف استراتژی مناسب جهت بهبود مدیریت نگهداری و تعمیر برای هر دستگاه می‌باشد.



نمودار ۲. تعیین استراتژی‌های نت بر اساس شاخص‌های اولویت ریسک-حساسیت کل

بحث و نتیجه‌گیری

افزایش روزافزون هزینه دستگاه‌ها و ماشین‌آلات و لزوم دستیابی به سطح بالایی از قابلیت اطمینان در آن‌ها بر اهمیت مدیریت نگهداشت و تعیین استراتژی مناسب برای هر دستگاه افزوده است. هدف تحقیق حاضر نیز تعیین استراتژی نگهداشت دستگاه‌ها با بهره‌گیری از رویکرد تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست فازی و سیستم استنتاج فازی بوده است. اغلب پژوهش‌های مرتبط با این مساله که تاکنون در کشور ما انجام شدند، از رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی گزینه‌های نگهداری و تعمیرات استفاده کردند (آقایی و

فضلی، ۱۳۹۱؛ شفیعی نیک آبادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ عبدالله زاده و همکاران (۱۳۹۴) این در حالی است که تعیین استراتژی‌های مذکور بدون تحلیل ریسک، چالش برانگیز است؛ از طرفی مطالعاتی که به علل ریسک با تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست پرداخته‌اند صرفاً به معیارهای اصلی "عدم تشخیص خطا"، "احتمال وقوع خطا" و "شدت خطا" اکتفا کردند (ربانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ میرغفوری و همکاران، ۱۳۹۳؛ خشا و همکاران ۱۳۹۲) و به شاخصه‌های فرعی هریک از این معیارها که می‌تواند شناخت دقیق‌تری را از آن معیارها ارائه کند توجه نشده است. در مطالعه حاضر برای غلبه بر ابهام و عدم قطعیت موجود در ارزیابی شکست‌های دستگاه‌ها توسط خبرگان، از متغیرهای کلامی استفاده شد که مزیت آن ارائه قضاوت‌های واقعی‌تر و ارزیابی معنادارتر از معیارهای شکست درسیستم تحت مطالعه از سوی خبرگان بوده است. همچنین برای افزایش دقت و اعتبار ورودی‌های مدل صرفاً نظرات خبرگان متخصص و با سابقه کاری زیاد در نظر گرفته شد و در مورد قواعد سیستم استنتاج نیز، با تعریف شاخصه‌های فرعی حداکثر دقت در ارزیابی معیارها به کار گرفته شد. نهایتاً در مرحله تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات نیز مشخصه‌های دستگاه‌ها برای ارزیابی میزان حساسیت آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا نتایج قابل اتکایی برای نیروگاه مذکور فراهم شود. قابل ذکر است که مشخصه‌های مذکور (سن دستگاه، آسیب‌های کار با دستگاه، اثربخشی جامع تجهیزات، الزامات نگهداری) را نمی‌توان به عنوان شاخصه‌های فرعی در تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست در نظر گرفت، در حالی که در تعیین استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات نقش مهمی دارند.

یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که دستگاه کندانسور توربین با مقدار عدد اولویت ریسک ۷/۵۰ بیشترین میزان ریسک شکست را داراست و دستگاه‌های الکتروموتور، اف دی فن، ایرپری هیتر و ژنراتور به ترتیب با مقدار عدد اولویت ریسک ۷/۲۸، ۷/۲۱، ۷/۱۹، ۶/۵۶ در اولویت‌های بعدی قرار دارند. نتایج بررسی میزان حساسیت دستگاه‌ها نشان می‌دهد دستگاه ژنراتور با میزان حساسیت کل ۰/۵۵ در اولویت اول و دستگاه الکتروموتور با میزان حساسیت

۰/۲۹ در اولویت آخر و بقیه دستگاه‌ها (ایر پری هیتز، کندانسورتورین، اف دی فن) به ترتیب با میزان حساسیت ۰/۴۲، ۰/۴۰، ۰/۳۶ در بین آن‌ها قرار دارند.

از نتایج تحقیق حاضر می‌توان استنباط کرد تمامی دستگاه‌های مورد مطالعه از اولویت ریسک نسبتاً زیادی برخوردار هستند؛ دستگاه ژنراتور نیز دارای بالاترین میزان حساسیت در میان دستگاه‌های مورد مطالعه نیروگاه می‌باشد. به این ترتیب با توجه به نمودار عدد اولویت ریسک-حساسیت کل، برای دستگاه ژنراتور استراتژی نگهداری و تعمیرات پیش اقدامانه پیشنهاد می‌شود. لذا با فرض ثابت بودن شرایط دستگاه از نظر اولویت ریسک و حساسیت کل، تحلیل علت ریشه‌ای خرابی یا بازننگری در طراحی این دستگاه ضروری به نظر می‌رسد. برای دستگاه‌های با میزان حساسیت پایین‌تر که در بعد سوم قرار گرفتند نیز استراتژی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت پیشنهاد می‌گردد. از آنجا که در حال حاضر نگهداری و تعمیرات دستگاه‌های نیروگاه، به صورت تعمیرات دوره‌ای و اصلاحی انجام می‌پذیرد، ضرورت بازننگری در مدیریت نگهداری و تعمیرات کاملاً مشهود است.

قابل ذکر است محققان در نمودار شاخص اولویت ریسک-حساسیت کل پیشنهادی از حد آستانه میانه استفاده کردند؛ بنابراین با توجه به اهمیت رشته‌های مختلف علوم نظیر پزشکی، نظامی، هسته‌ای و همچنین حساسیت دستگاه‌ها در صنایع مختلف و دقت در نگهداری و تعمیرات این تجهیزات، می‌توان روش‌های دیگری را برای تعیین حد آستانه و در نتیجه تعیین استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات به کار برد. همچنین، با تاکید به اینکه در این مطالعه از نظرات متخصصین با تجربه حوزه نگهداری و تعمیرات نیروگاه برق شهیدسلیمی نکا و همچنین مدل استنتاج ترکیبی برای پردازش نظرات مذکور استفاده شده است می‌توان اذعان داشت که نتایج آن از قابلیت اطمینان مطلوبی برخوردار بوده است؛ از این رو پیشنهاد می‌شود تا برای تعیین استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات به‌ویژه برای دستگاه‌های اصلی تولید برق مانند ژنراتور برنامه‌ای بر مبنای الگوی ارائه شده طراحی گردد.

منابع

آقای، میلاد؛ فضلی، صفر. (۱۳۹۱). "بکارگیری رویکرد ترکیبی DEMATEL و ANP برای انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات (مطالعه موردی: صنعت خودردهای کار)". چشم انداز مدیریت صنعتی، ۲(۶): ۸۹-۱۰۷.

خشا، رقیه؛ سپهری، محمد مهدی؛ خطیبی، توکتم؛ سروش، احمد رضا. (۱۳۹۲). "کاربرد FMEA فازی برای بهبود گردش کار در اتاق‌های عمل". نشریه مهندسی صنایع، ۴۷(۲)، صص ۱۳۵-۱۴۷.

ربانی، علی؛ زارع، حبیب؛ بهنیا، فروغ (۱۳۹۲). "ارائه الگوی مناسب جهت پیاده سازی سیستم نگهداری و تعمیرات در کارخانجات خطوط تولید پیوسته با رویکرد مدل‌های تصمیم‌گیری و برنامه ریزی آرمانی فازی". مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۱(۳۱): ۸۵-۱۰۰.

شفیعی نیک آبادی، محسن؛ فرج پور خانانپشتانی، حبیب؛ افتخاری، حسین؛ سعدآبادی، علی اصغر (۱۳۹۴). "بکارگیری رویکرد ترکیبی FA، AHP و TOPSIS برای انتخاب و رتبه بندی استراتژیهای مناسب نگهداری و تعمیرات". مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۳(۳۹): ۳۵-۶۲.

عبداله زاده، غلامرضا؛ نوروزی، حمید؛ طاهری امیری، محمد جواد؛ حقیقی، فرشیدرضا. (۱۳۹۴). "انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری بهینه پلها بر مبنای الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره و مدل برنامه‌ریزی ریاضی (مطالعه موردی: پل‌های استان مازندران)". فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل، ۳(۶): صص ۴۶۸-۴۶۳.

میرغفوری سیدحبيب اله، اسدیان اردکانی، فائزه، عزیزى فاطمه، (۱۳۹۳). "توسعه مدلی برای تجزیه و تحلیل ریسک صنعت کاشی و سرامیک با استفاده از FMEA و تحلیل پوششی داده‌ها". مجله ایرانی مطالعات مدیریت، ۷(۲): ۳۴۳-۳۴۳.

Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2010). "Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming". *Safety science*, 48(2), 238-247.

Ahmadi, M., Behzadian, K., Ardeshir, A., & Kapelan, Z. (2016). "Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA

techniques in highway construction projects”. *Journal of Civil Engineering and Management*, 1-11.

Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). “Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP”. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 1028-1036.

Awad, M., Awad, M., As’ ad, R. A., & As’ ad, R. A. (2016). “Reliability centered maintenance actions prioritization using fuzzy inference systems”. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(4), 433-452.

Batbayar, K., Takács, M., & Kozlovszky, M. (2016, May). “Medical device software risk assessment using FMEA and fuzzy linguistic approach: Case study”. In *Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), 2016 IEEE 11th International Symposium on* (pp. 197-202). IEEE.

Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). “Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis”. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(2), 203-213.

Chin, K. S., Chan, A., & Yang, J. B. (2008). “Development of a fuzzy FMEA based product design system”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(7-8), 633-649.

Chang, D. Y. (1996). “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP”. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655.

Dağsuyu, C., Göçmen, E., Narlı, M., & Kokangül, A. (2016). “Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit”. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 286-294.

Efendigil, T., Önüt, S., & Kahraman, C. (2009). “A decision support system for demand forecasting with artificial neural networks and neuro-fuzzy models: A comparative analysis”. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 6697-6707.

Guimarães, A. C. F., & Lapa, C. M. F. (2004). “Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system”. *Progress in Nuclear Energy*, 44(3), 191-213.

Guimarães, A. C. F., & Lapa, C. M. F. (2007). "Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems". *Applied Soft Computing*, 7(1), 17-28.

Jamshidi, A., Rahimi, S. A., Ait-Kadi, D., & Ruiz, A. (2015). "A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices". *Applied Soft Computing*, 32, 322-334.

Kumru, M., & Kumru, P. Y. (2013). "Fuzzy FMEA application to improve purchasing process in a public hospital". *Applied Soft Computing*, 13(1), 721-733.

Pillay, A., & Wang, J. (2003). "Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning". *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), 69-85.

Rafie, M., & Namin, F. S. (2015). "Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system". *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(4), 655-663.

Spath, P. L. (2003). "Using failure mode and effects analysis to improve patient safety". *AORN journal*, 78(1), 15-37..

Shahin, A., Pourjavad, E., & Shirouyehzad, H. (2012). "Selecting optimum maintenance strategy by analytic network process with a case study in the mining industry". *International Journal of Productivity and Quality Management*, 10(4), 464-483.

Sharma, R. K., Kumar, D., & Kumar, P. (2005). "Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling". *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22(9), 986-1004.

Tay, K. M., & Lim, C. P. (2006). "A Guided Rule Reduction System for Prioritization of Failures in Fuzzy FMEA". In *Applications of Soft Computing* (pp. 301-310). Springer Berlin Heidelberg.

Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean". *Expert systems with applications*, 36(2), 1195-1207.

Wang, Y., Cheng, G., Hu, H., & Wu, W. (2012). "Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(6), 958-965.

Xu, K., Tang, L. C., Xie, M., Ho, S. L., & Zhu, M. L. (2002). "Fuzzy assessment of FMEA for engine systems". *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 17-29.

Yeh, R. H., & Hsieh, M. H. (2007). "Fuzzy assessment of FMEA for a sewage plant". *Journal of the Chinese institute of industrial engineers*, 24(6), 505-512.