فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال نوزدهم/ شماره ۷۰ / زمستان ۱۴۰۳

طراحی و پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان با استفاده از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) و آنالیز ریسک (مطالعه موردی: شرکت تولید مواد اولیه الیاف مصنوعی)

امیر یوسفی
گروه صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
ام البنین یوسفی (نویسنده مسؤل)
استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
Email: yousefi_1302@yahoo.com
مهدی کرباسیان
استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

چکیده

انقلاب صنعتی چهارم (صنعت ۴.۰) چالش های جدیدی را به همراه دارد و نیازمند رویکردی جدید ، تفکری جدید و همراهی با استانداردهای بین المللی مدیریت ریسک و دارایی های فیزیکی و نگهداری و تعمیرات نسل چهارم دارد. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)نه تنها پیشرفته‌ترین رویکردها است و با استانداردهای بین‌المللی برای مدیریت دارایی‌های فیزیکی و مدیریت ریسک مطابقت دارد، بلکه به کاربران اجازه می‌دهد تا خطرات و ریسک های مربوط به مالکیت و عملیات دارایی‌ها را کاملاً درک و کمی سازی کنند. تحقیق حاضر با هدف طراحی و پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و ریسک، به عنوان مطالعه موردی در یکی از صنایع بالادستی صنعت نساجی یعنی شرکت تولید مواد اولیه الیاف مصنوعی انجام شده است. در این راستا پس از انجام مطالعات اولیه و جمع آوری اطلاعات تجهیزات، در مرحله اول با استفاده از برخی شاخص‌های عملکرد کلیدی (KPI) و بکارگیری یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره یعنی تاپسیس،تجهیزات از لحاظ بحرانی بودن اولویت‌بندی شده واز بین آنها بحرانی‌ترین تجهیز شناسائی شد. در مرحله بعدی برای تجهیز منتخب، بلوک دیاگرام‌های کارکردی (FBD) ترسیم و کاربرگ FMEA برای آن تکمیل شد و در نهایت با استفاده از تکنیک‌های آنالیز ریسک تعداد ۱۱۳ عدد خرابی بحرانی شناسائی شدند و با استفاده از نمودار تصمیم‌گیری و کاربرگ RCM برای هر نوع خرابی استراتژی‌های مناسب نگهداری و تعمیرات تعیین شد،که نتایج نشان می‌دهد فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات شامل نت اقتضائی است به میزان ۶۹٪ سپس به ترتیب بازسازی زمان‌بندی شده ۱۰٪، جستجوی شکست ۵ ٪، از رده خارج کردن زمان‌بندی شده ۷ ٪، باز طراحی ۷ ٪ و کمترین مقدار مربوط به کارکرد تا شکست به میزان ۲ ٪ می‌باشد.

کلمات کلیدی: نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، بلوک دیاگرام کارکردی، ریسک، شاخص‌های عملکرد کلیدی و FMEA.

۱-مقدمه

یکی از چالش‌های کنونی تولیدکنندگان در بازار رقابتی کنونی، تولید بهنگام و قیمت تمام شده پائین می‌باشد، که آنها را ناگزیر از استفاده از تکنولوژی و تجهیزات جدید نموده است، که خود باعث تحمیل هزینه‌های بسیار بالائی به مقوله‌ی تولید می‌گردد و سهم قابل توجهی از هزینه‌ها، مربوط به نگهداری و تعمیرات می‌باشد و در نتیجه باعث افزایش قیمت تمام شده محصول می‌گردد. با بررسی‌های انجام شده تخمین زده می‌شود که ۸۵ ٪ از کل هزینه چرخه حیات تجهیزات طول عملیات، مربوط به عملیات پشتیبانی، سرویس و نگهداری تجهیزات تعیین می‌باشد. از اینرو جهت بهینه‌سازی و بهره‌ور نمودن سیستم نگهداری و تعمیرات و در راستای کاهش هزینه‌ها، از بین تجهیزات متعدد موجود، تمرکز بر موارد بحرانی‌تر انجام می‌شود که این امر با بکارگیری سیستم نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان میسر می‌گردد. در اصل هدف اصلی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان کاهش هزینه نگهداری با تمرکز بر عملکرد سیستم و یا تجهیزات بحرانی و اجتناب از اقدامات نگهداری و تعمیراتی است که ضروری نیستند(Dowling & Schuerger, 2015). قابلیت اطمینان بالا و در دسترس بودن، همراه با هزینه‌های پائین چرخه عمر از اهداف کلی برای تمام برنامه‌های نگهداری و تعمیرات است. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان فرآیندی است که عملیات نگهداری و تعمیرات را به شیوه‌ای کارآمد، مقرون‌به‌صرفه، قابل اطمینان و ایمن اجرا می‌کند. چالش‌های بسیاری برای حفظ تعادل در سطح بالای قابلیت اطمینان و هزینه‌های اقتصادی وجود دارد. به عنوان مثال، انجام عملیات نگهداری و تعمیرات بر روی تمام اجزای یک سیستم یا تجهیزات فرآیندی ممکن است مقرون‌به‌صرفه نباشد. بنابراین، لازم است موارد حیاتی(بحرانی) شناسایی شوند و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات تنها باید روی آنها انجام شود. شناسایی اجزای و تجهیزات حیاتی و اولویت‌بندی آنها برای اجرای نگهداری و تعمیرات یک امر بسیار مهم در صنعت جهت کاهش توقفات می‌باشد که یکی از گام‌های اساسی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان محسوب می‌شود و با بررسی‌های انجام شده و مطالعه تحقیقات قبلی، روشی برای شناسائی و اولویت‌بندی تجهیزات وجود ندارد، همچنین با توجه به اینکه یکی از مراحل مهم در روند RCM شناسائی خرابی‌های (شکست‌های) کردی است و از بین خرابی‌های مشخص شده بایستی بحرانی‌ترین آنها برای انجام تحلیل مشخص شوند.

۲-روش شناسی پژوهش

الف) پیشینه تحقیق

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به عنوان یک رویکرد پیشرو در صنعت پدیدار شده است و یک روش سیستماتیک برای تعیین مناسب ترین استراتژی نگهداری برای تجهیزات ارائه می دهد. با تجزیه و تحلیل عواملی مانند بحرانی بودن تجهیزات، حالت های خرابی و پیامدهای بالقوه، RCM به سازمان ها کمک می کند تا تصمیمات آگاهانه ای در مورد فعالیت های نگهداری و تعمیرات بگیرند، عملکرد بهینه را تضمین کنند و اختلالات را به حداقل برسانند (Seyed Hosseini et al., 2024). نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان اوایل دهه ۱۹۶۰ در صنعت هوانوردی آمریکا به کار گرفته و اولین کاربرد تئوری RCM در صنعت هوانوردی به طور موثر قابلیت اطمینان تجهیزات را بهبود بخشید (Moubray, 1997). در سال ۱۹۷۸، گزارش "نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان" نوشته استنلی نولان و هاوارد هیپ از ATA، منجر به انتشار RCM-II می شود، روشی اثبات شده و پذیرفته شده است و به طور مداوم توسعه یافته و در عمل بهبود یافته است و اخیراً برای زمینه های مختلف صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang et al., 2020)، به طوری که در برخی تحقیقات:

مجیا[1] و همکاران(۲۰۲۵)، در یک مطالعه موردی کاربرد تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) در سیستم‌های تولید بخار را با هدف جلوگیری از خرابی‌های احتمالی با درک علل و پیامدهای آنها و تعیین اقدامات لازم برای حفظ دارایی‌های فیزیکی برای یک شرکت نساجی برای یک دیگ بخار که به دلیل خرابی دچار توقف های ناخواسته پیاده سازی کردند و تجزیه و تحلیل بحرانی تجهیزات بویلر را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام دادند و اقدام به ارزیابی حالت‌ها و اثرات

[1] Mejia

شکست نمودند و بر اساس آن یک برنامه نگهداری و تعمیرات ارائه نمودند که حاصل آن افزایش ۱۶/۱۵ درصدی قابلیت اطمینان ، افزایش ۰/۰۰۴ درصدی در دسترس بودن علاوه بر این، صرفه جویی در هزینه نگهداری سالانه تا ۲۷/۵۴٪ بود. مرادی و همکاران (۲۰۲۴)، یک چارچوب RCM سه مرحله‌ای برای شناسایی فیدر توزیع برق حیاتی ، اولویت‌بندی شکست ها و تخصیص استراتژی نگهداری و تعمیرات بهینه پیشنهاد نمود و از روش‌های BWM برای شناسایی فیدرهای حیاتی و اولویت‌بندی حالتهای شکست استفاده نمودند و استراتژی نگهداری و تعمیرات بهینه به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای به حداقل رساندن هزینه های نگهداری و تعمیرات ارائه کردند.

زادیران و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود روش جدید شناسایی فرآیند تخریب و زوال در رویکرد نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان تجهیزات انرژی ارائه نمودند. پای تیل[2] و همکاران (۲۰۲۲)، روش RCM را برای سیستم دیگ بخار مورد استفاده در صنایع نساجی هند بکار بردند. و با استفاده از سیستم های اطلاعاتی نیمه کامپیوتری، پایگاه داده نت ناکافی، و اطلاعات مربوط به هزینه های نگهداری و از دست دادن تولید از یک رویکرد RCM اصلاح شده شامل تعداد زیادی از متخصصان توسعه دادند. و در نهایت، استراتژی های نگهداری برنامه ریزی شده و فواصل آنها برای اطمینان از ادامه عملکرد صحیح سیستم توصیه نمودند . سوپریانتو[3] و همکاران (۲۰۲۱)، در تحقیق خود در یکی مطالعه موردی اقدام به ارزیابی عملکرد نگهداری و تعمیرات در پیاده‌سازی RCM نمودند. به اعتقاد آنها نگهداری و تعمیرات یک عملکرد اصلی تولید است که برای فعال نگه داشتن سیستم های تولید و جلوگیری از خرابی ضروری است. در نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)، نگهداری و تعمیرات بر اساس شواهد ملموس اجرا می شود که میزان خرابی تجهیزات را کاهش می دهد و مزیت رقابتی و رضایت مشتری را افزایش می دهد. آنها در تحقیق خود اقدام به تجزیه و تحلیل عملکرد نگهداری و تعمیرات و شناسایی شاخص‌های بالقوه انجام دادند تا اطمینان حاصل کنند که بخش نگهداری و تعمیرات رقابتی و کارآمد است. بر طبق این تحقیق مشخص شد که انتخاب تجهیزات حیاتی با استفاده از FMEA با استفاده از RCM، امکان پذیر است و RCM یک روش اثبات شده است که با موفقیت به اهداف شرکت می رسد همچنین آموزش کارکنان نگهداری و تعمیرات برای اندازه گیری عملکرد ضروری است. در دسترس بودن قطعات یدکی بهینه شده و در نتیجه هزینه ها را کاهش می دهد همچنین RCM کمک میکند تا تمام وظایف برنامه ریزی شود و در نتیجه اضافه کاری کاهش یابد. صالحیان و جهان (۱۴۰۰)، در تحقیق خود، علاوه بر تشریح سیستم نگهداری و تعمیرات بر مبنای قابلیت اطمینان ، تجربیات اجرای سیستم مذکور را در شرکت توزیع گاز استان سمنان به اشتراک گذاشتند و با انتخاب یکی از تجهیزات به عنوان تجهیز بحرانی برای پیاده سازی روش شناسی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان بر اساس سوابق دادههای موجود در شرکت انجام دادند و با شناسایی کارکردها، شکست های کارکردی، حالات و اثرات شکست، فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر یک از حالت های خرابی تجهیز مورد نظر تعیین نمودند همچنین در این مطالعه نشان دادند که با کمتر نمودن تعداد فعالیت های غیرضروری میتوان تعداد نیروی انسانی و زمان کمتری صرف انجام فعالیت های نت نمود و با به کارگیری فعالیت های نت مناسب، وضعیت ایمنی و آلودگی های زیست محیطی ار نیزمی تواند بهبود یابد.

نصری و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیق خود از رویکرد RCM بر سیستم حفاظت دیستانس بر روی خطوط توزیع برق موجود در شبکه‌های انتقال استفاده نمودند و برای دستیابی به برنامه بهینهٔ نگهداری و تعمیرات برای سیستم مذکور ، یک روند کلی شامل ۱: شناخت و تحلیل تجهیزات موجود در سیستم حفاظت و مدهای خرابی هر تجهیز. ۲: تعیین نوع وظیفهٔ نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر تجهیز موجود در سیستم حفاظت با استفاده از فلوچارت تصمیم‌گیری RCM و نظرات افراد خبره و آگاه به سیستم حفاظت. ۳: تشکیل مدل مارکوف برای کل سیستم حفاظت دیستانس برای محاسبهٔ قابلیت اطمینان با توجه به گام‌های پیشین. ۴: استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور یافتن برنامهٔ نگهداری و تعمیرات با قابلیت اطمینان بالا و هزینهٔ کم با تعیین ضرایب بهینهٔ مدل مارکوف انجام دادند و با بررسی سوابق خرابی تجهیزات و با استفاده از دانش افراد خبره، مدهای خرابی هر تجهیز و اثرات این خرابی‌ها بر سیستم شناسایی و استخراج نمودند. این مدها و اثرات خرابی و همچنین، نوع وظیفهٔ نگهداری و

[2] Patil
[3] H. Supriyanto

تعمیرات مناسب برای هر مد خرابی در جداولی آورند نوع وظیفهٔ نگهداری و تعمیرات لازم با استفاده از نمودار تصمیم‌گیری RCM به دست آوردند.

اریکسن[4] و همکاران (۲۰۲۱)، در تحقیق انجام شده یک رویکرد RCM برای ارزیابی چالش‌های قابلیت اطمینان و نیازهای نگهداری و تعمیرات کشتی‌های باری بدون سرنشین ارائه دادند. آنها در مقاله خود کاربرد روش نگهداری و تعمیرات متمرکز (RCM) را برای ارزیابی نیازهای نگهداری و تعمیرات و مسائل قابلیت اطمینان را بررسی کردند. آنها در مطالعه موردی خود برنامه ها و سوابق نگهداری و تعمیرات، فواصل زمانی برای یک سیستم ماشین آلات مشابه به عنوان مرجعی که وظایف نگهداری و تعمیرات معمولاً برای آنها انجام می شود استفاده نمودند و دریافتند که روش RCM به طور کلی برای مدیریت نگهداری و تعمیرات و بررسی مسائل قابلیت اطمینان برای عملیات بدون سرنشین مناسب است، اما محدودیت هایی نیز وجود دارد و بسیاری از وظایف نگهداری و تعمیرات اصلاحی به طور ضمنی در سناریوی عملیاتی گنجانده شده اند و تأثیر این وظایف نگهداری و تعمیرات اصلاحی به اندازه وظایف نگهداری پیشگیرانه که به صراحت از تجزیه و تحلیل RCM ناشی می شود قابل مشاهده نیست. بنابراین یک روش ساختارمندتر برای ارزیابی اثرات وظایف نگهداری و تعمیرات اصلاحی در تحقیق خود پیشنهاد نمودند.

آلتا[5] و همکاران(۲۰۲۰)، در پژوهشی به مطالعه موردی در معدن کارخانه سیمان پرداختند. هدف آنها توسعه برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه با اجرای روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان و ارائه یک برنامه فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه با محدودیت‌های برآورده کردن ساعات تولید برای انتقال سنگ آهک و سیلیکا به هر کارخانه‌های مختلف بود و ضمن اجرای روش نت مبتنی بر قابلیت اطمینان و استفاده از آنالیز درخت خطا[6](FTA) یک برنامه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه دادند و براساس محاسبه و نتایج حاصل انشان دادند که می‌توان زمان شکست را تا ۴۲ ٪ کاهش دهد. یاوز[7] و همکاران (۲۰۱۹)، از روش نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در صنایع عذایی استفاده کردند. آنها کاربرد رویکرد RCM بر روی ماشین‌های بسته‌بندی و تاثیر آن بر OEE[8] را مطالعه نمودند و عملکرد واقعی تجهیزات در فرآیند و رابطه‌اش با محصول را برای تیم‌هایی که از تجهیزات استفاده می‌کنند. افضلی و همکاران (۲۰۱۹)، یک شاخص وزنی قابلیت اطمینان و یک روش به منظور اولویت بندی اجزاء سیستم توزیع برای نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در دو سطح مختلف ارائه نمودند. سطح اول: فیدرهای ایستگاه توزیع برای فعالیت‌های نت اولویت‌بندی نمودند و در سطح دوم، برای اجزای یک فیدر فعالیت‌های RCM را اولویت‌بندی نمودند. گوپتا[9]و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از نت مبتنی بر قابلیت اطمینان به شناسایی مؤلفه های مهم و اولویت بندی آنها برای اجرای نگهداری و تعمیرات اقدام نمودند، پنج معیار مؤثر بر بحرانی بودن قطعات یعنی هزینه، وابستگی کارکردی، پیچیدگی، نگهداری، و تاثیرات ایمنی را برای تجزیه و تحلیل حساسیت پیشنهاد نمودند و برای شناسایی مؤلفه های مهم از یک شبکه سلسله مراتبی مبتنی بر فرآیند تحلیلی شبکه استفاده نمودند.

آنها با استفاده از روش ANP[10] اقدام به شناسایی اجزاء بحرانی برای پیاده‌سازی RCM نمودند و عوامل کلیدی مرتبط با میزان بحرانی بودن اجزای سازنده را نیز مشخص نمودند. صفی‌پور و همکاران(۱۳۹۷)، به بررسی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان برای ماشین‌آلات راهسازی با شناسایی و ثبت چالش‌ها و راهکارهای ممکن و کاربردی انجام دادند که نتایج کاهش نرخ خرابی و نزدیک به ۵۰ ٪ کاهش هزینه را نشان داد و دریافتند که برای رسیدن به هدف اصلی، اهداف ویژه‌ای مدنظر می‌باشند که عبارتند از ممیزی فنی، عارضه‌یابی، آموزش، مشاوره و راهبری، بهینه سازی، طراحی،تدوین و اجرای فعالیت‌های پیش اقدام، تأمین

[4] Eriksen
[5] Alta
[6] FAULT TREE ANALYSIS
[7] Yavuz
[8] Overall Equipment Effectiveness
[9] Gupta
[10] Analytic Network Process

قطعات، برنامه‌ریزی و اجرای اقدام اصلاحی مبتنی بر عمر. پیشن[11]و همکاران (۲۰۱۶)، رویکرد جدیدی برای برنامه‌های نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در سیستم های توزیع برق مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حل مسائل ریاضی بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و محاسبه قابلیت اطمینان یک سیستم توزیع برق ارائه نمودند.. هدف اصلی آنها : به حداکثر رساندن شاخص قابلیت اطمینان سیستم، به حداقل رساندن هزینه های نت پیشگیرانه بود. در مدل آنها، محدوده شاخص‌ها به عنوان محدودیت برنامه های نگهداری در نظر گرفته شده است و یک الگوریتم برای حل مدل چندبعدی ارائه شده است که یک مرز پارتو بهینه شده را ارائه نمودند.

گوپتا[12]و همکاران (۲۰۱۶)، اقدام به تجزیه و تحلیل SWOT[13] برای شناسائی عوامل مهم برای پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان ، نمودند، آنها با استفاده از تحلیل SWOT از چارچوب‌های مختلف RCM که به طور گسترده توسط صنایع در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چارچوب‌های موجود را به سه گروه مختلف: الف، ب و ج دسته‌بندی کردند و نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای هر یک از این گروه‌ها شناسایی کردند. علیزاده و همکاران (۱۳۹۸)، یک مدل بهینه سازی RCM ناوگان خودروهای سبک ناجا ارائه دادند و با توجه به اینکه یکی از مولفه های آمادگی برای سازمان ها به ویژه سازمان های نظامی و انتظامی، آماده به کاری تمامی تجهیزات و منابع سازمانی در تمامی زمان ها با صرف کمترین هزینه برای انجام ماموریت است از روش نت مبتنی بر قابلیت اطمینان برای حل این مشکل استفاده کردند و مدلی برای بهینه سازی هزینه های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان دادند.

والمحمدی و همکاران (۱۳۹۶)، مطالعه‌ای جهت انتخاب استراتژی نگهداری و تعمیرات بمنظور بهبود شاخصهای ارزیابی قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری در یک شرکت تأمین کننده ماشین آلات حوزه نفت و گاز انجام دادند و با استفاد از فرمهای بازرسی، علت و معلول و آنالیز اثرات و حالات شکست از تعداد ۹ عدد دستگاه تراش در دو فاز مطالعاتی استخراج نمودند. شفیعی نیک‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴)، با بکارگیری یک رویکرد ترکیبی و با استفاده از تکنیک تحلیل عاملی(FA)، تحلیل سلسله مراتبی[14] و روش تاپسیس، اقدام به انتخاب بهترین استراتژی نگهداری و تعمیرات در پالایشگاه نفت شهر ری نمودند. اغنیاء و همکاران (۱۳۹۵)، اقدام به شناسایی مؤلفه‌های مؤثر جهت استقرار نت مبتنی بر قابلیت اطمینان در یک سازمان هوایی نمودند و با تکمیل الگوی قابلیت اطمینان، به شناسایی مؤلفه‌های مؤثر بر نگهداری و تعمیرات وسایل پروازی بر سازمانهایی که بر اساس نگهداری پیشگیرانه فعالیت می‌نمایند، پرداختند و راهکارهای پیاده‌سازی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان را ارائه نمودند و دریافتند که مهمترین مؤلفه‌ها جهت استقرار RCM به ترتیب عبارتند از تحلیل درخت‌واره منطقی تصمیم‌گیری، توانایی شناسایی و رتبه‌بندی سیستم‌ها، توانایی جمع‌آوری اطاعات، تصمیم‌گیری وظایف، تکالیف و طراحی مجدد، توانایی فهرست سازی و رتبه بندی خرابیها، شناسایی اقلام مهم به لحاظ وظیفه‌ای. سالم پور و همکاران (۱۳۹۴)، به بررسی چگونگی استقرار و پیاده‌سازی سیستم نت مبتنی بر قابلیت اطمینان برای ماشین آلات راه‌سازی پرداختند و با پیاده‌سازی واقعی به چگونگی رفع موانع و کمبودهای موجود اقدام نمودند.

ب) بررسی شکاف تحقیقاتی

با بررسی مطالعات گذشته طبق جدول ۱مشخص شد در مطالعات قبلی بیشتر از رویکرد کلاسیک استفاده نموده اند و اکثر تحقیقات انجام شده قبلی بر اساس پیاده سازی دو رویکرد مذکور انجام شده است، بنابراین چارچوب این تحقیق بر اساس مدل RCM-II خواهد بود که از جدیدترین نسل از رویکرد نت مبتنی بر قابلیت اطمینان است.همچنین روشهای استفاده شده در تحقیقات قبلی از جمله روش PM و RCM کلاسیک، از لحاظ در نظر گرفتن و پرداختن به مخاطرات مربوط به حالتهای مختلف خرابی دارای کاستی هایی هستند **که** RCM-II تلاش میکند تا از طریق شناسایی ریسکهای مرتبط با خرابی تجهیزات، این کاستی‌ها را برطرف کند. RCM-II شرایطی را برای اتخاذ تصمیمات صحیح مدیریت دارایی برای عملکرد بهینه سیستم

[11] Piasson
[12] Gupta
[13] Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats
[14] Analytic Hierarchy Process

های فنی و در عین حال در نظر گرفتن مسائل ایمنی و محیط زیست با هدف به حداکثر رساندن انطباق با راهبردها و سیاستهای نگهداری و تعمیرات را ایجاد میکند که تنها در تعداد محدودی از تحقیقات قبلی از موارد زیست محیطی و ایمنی به موارد فنی به طور همزمان در پیاده سازی یک رویکرد نت به کار برده شده است و تنها فرآیندهای این رویکرد هستند که به طور کامل از استاندارد در دستیابی مذکور برای رسیدن به ریسک کمتر هنگام نگهداری دارایی های فیزیکی پشتیبانی می کنند و از طرفی از دیگر ویژگیهای منحصر به فرد این رویکرد به این موضوع میتوان اشاره کرد که RCM-II به طور کامل با سایر رویکردهای مبتنی بر ریسک مانند بازرسی مبتنی بر ریسک (RBI) و تجزیه و تحلیل شکست ریشه(RCFA) ادغام می‌شود. لذا در این تحقیق تلاش شده، اولاً روشی جهت الویت‌بندی تجهیزات از لحاظ بحرانی بودن و شناسائی بحرانی‌ترین تجهیز ارائه شود و ثانیاً روشی جهت شناسائی ، تفکیک و مشخص نمودن خرابی‌های بحرانی ارائه شود و در نهایت برای هر نوع شکست و خرابی‌های بحرانی، سیاست نت مناسب معرفی خواهد شد.

جدول (۱): پیشنیه تحقیق

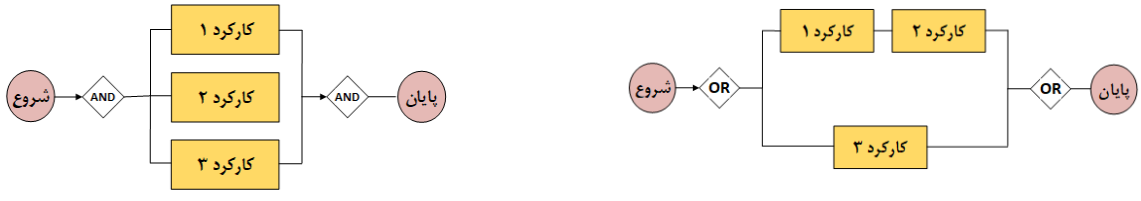
محقق	سال	انتخاب تجهیز بحرانی		معیارهای انتخاب تجهیز				تکنیک انتخاب تجهیز			آنالیز ریسک		تکنیک آنالیز ریسک			رویکرد نت		مطالعه موردی
		دارد	ندارد	هزینه	MTBF	FMECA	دیگر موارد	نظر خبرگان	MCDM	دیگر موارد	دارد	ندارد	درخت تصمیم	عددRPN	ماتریس ریسک	RCM کلاسیک	RCM-II	
مجیا و همکاران	۲۰۲۵	✓					✓				✓					✓		✓
مرادی و همکاران	۲۰۲۴		✓								✓					✓		
زادیران و همکاران	۲۰۲۳		✓								✓							
پایتیل و همکاران	۲۰۲۲	✓				✓												✓
سوپریانتو وهمکاران	۲۰۲۱		✓								✓			✓			✓	✓
صالحیان و جهان	۱۴۰۰	✓					✓	✓									✓	
نصری و همکاران	۱۳۹۹		✓								✓					✓		✓
اریکسن وهمکاران	۲۰۲۱		✓								✓				✓	✓		✓
آلتا و همکاران	۲۰۲۰	✓		✓	✓		✓				✓			✓		✓		✓
افضلی و همکاران	۲۰۱۹	✓		✓					✓		✓					✓		✓
یاوز و همکاران	۲۰۱۹	✓			✓						✓					✓		✓
گوپتا و همکاران	۲۰۱۸	✓																✓
صفی‌پور و همکاران	۱۳۹۷	✓									✓					✓		✓
پیشن و همکاران	۲۰۱۶		✓								✓					✓		✓
گوپتا و همکاران	۲۰۱۶		✓								✓							
علیزاده و همکاران	۱۳۹۸		✓								✓							✓
والمحمدی‌و همکاران	۱۳۹۶		✓								✓					✓		
شفیعی و همکاران	۱۳۹۴		✓								✓					✓		
اغنیاء و همکاران	۱۳۹۵		✓								✓					✓		
سالم پور و همکاران	۱۳۹۴		✓								✓					✓		
تحقیق حاضر	۱۴۰۳	✓						✓			✓		✓	✓	✓		✓	✓

ج) مراحل پژوهش

طبق بررسی‌های انجام شده و مطابق با مطالعات انجام شده طراحی و پیاده‌سازی رویکرد RCM دارای مراحل و گامهای مختلفی به شرح ذیل می‌باشد که به ترتیب نشان داده شده در شکل ۱ می باشد:

شکل شماره (۱): طراحی و پیاده‌سازی رویکرد RCM

گام اول انجام مطالعات اولیه و شناسائی مورد مطالعه است که در این گام یکی از مراحل (واحدهای) از فرآیند تولید شرکت تولید مواد اولیه الیاف مصنوعی برای پیاده‌سازی رویکرد RCM انتخاب شد، که این مهم با توجه به مستندات و سوابق موجود و همچنین با مشاوره با افراد خبره و با سابقه در بخش های بهره‌برداری و تعمیرات انجام شد و در این راستا مرحله سوم از فرآیند تولید شرکت بنام "واحد تقطیر استرخام" انتخاب شد در ادامه و در گام دوم که مربوط به شناسایی تجهیزات مهم و حیاتی در مرحله‌ی (واحد) مشخص شده از فرآیند تولید است با بکارگیری از یکی از روشهای تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) و استفاده از برخی KPIs مرتبط با نت به عنوان معیار تصمیم گیری استفاده می‌شود. در گام بعدی یعنی گام سوم: ترسیم نمودار بلوکی عملکرد(FBD) تجهیز بحرانی است، ابتدا بایستی نمودارهای کارکردی برای تمام وظایف و عملکردهای اصلی سیستم یا زیرسیستم‌های تجهیز مورد مطالعه را در هر سطح معین، ترسیم شود، این نمودار نحوه ارتباط بخش‌های داخلی سیستم را رفتار در حال کار سیستم، فعالیت، توالی آنها و آنچه باید اتفاق بیفتد را نشان می دهد. ساختار یک نمودارFBD متشکل از نقاط شروع و پایان، خطوط اتصال کارکردها و عملگرهای OR و AND و مستطیل شکلهایی که برای نمایش یک کارکرد از سیستم و یا زیر سیستم استفاده می‌شود، در این ساختارعملگر AND برای نشان دادن فعالیت‌ها وکارکردهایی که به صورت موازی(همزمان) باید انجام شوند، استفاده می‌شود و عملگر OR نشان دهنده مسیرهای جایگزین برای پیشبرد اهداف کارکردی یک سیستم و یا زیر سیستم است، عملگر OR برای نمایش مواردی است که یک کارکرد اتفاق نیافتد و مسیر جایگزین جهت بررسی و رفع عیب آن کارکرد، ایجاد شده است.دو نمونه از بلوک دیاگرام کارکردی باعملگر موازی و سری در شکلهای۲- الف و۲-ب نمایش داده شده است.



الف ب

شکل شماره (۲): الف) نمودار بلوکی کارکردی با عملگر موازی (AND) ب) نمودار بلوکی کارکردی با عملگر سری (OR)

- گام چهارم تجزیه و تحلیل حالت شکست و اثرات آن (FMEA) و ارزیابی ریسک در این مرحله برای تجهیز بحرانی انتخاب شده در مرحله قبل ،بایستی تجزیه و تحلیل حالت شکست و اثرات آن (FMEA) و ارزیابی ریسک انجام شود، در واقع تجزیه و تحلیل حالت شکست و اثرات آن (FMEA) یک تکنیک مهندسی است که برای تعریف، شناسایی و حذف شکست‌های

شناخته‌شده و یا بالقوه، مشکلات، خطاها و ... از سیستم، طراحی، فرآیند و یا خدمات استفاده می‌شود،بدین ترتیب که در این مرحله کاربرگ FMEA و آنالیز ریسک طراحی و جهت تکمیل اطلاعات در اختیار خبرگان و متخصصین قرار داده می شود و کلیه شکستها و آثار آن مشخص و با استفاده از یکی از تکنیک‌های ریسک یعنی RPN[15] به مشخص نمودن و اولویت‌بندی خرابی‌ها بحرانی اقدام می شود. (جدول ۲) این کاربرگ شامل موارد زیریل می باشد(Moubray,1997):

- سیستم: سیستم مجموعه‌ای از عناصر وابسته به یکدیگر (زیرسیستم) است که در کنار هم اهداف خاص را انجام می‌دهند
- زیرسیستم : زیر مجموعه‌های یک سیستم را که شامل قطعات و یا تجهیزات می‌باشد.
- کارکرد: عمل یا فعالیتی که از سیستم انتظار می رود انجام دهدکه شامل تعیین استانداردهای کارکردی است.
- کارکردها و استانداردهای عملکرد: قبل از آن که بتوان از یک فرآیند برای تعیین آنچه که باید انجام شود استفاده کرد. تا اطمینان حاصل شود که هر دارایی فیزیکی در شرایط عملیاتی فعلی خود، به کار خود ادامه می دهد.
- شکست کارکردی: حالتی که یک دارایی یا سیستم قادر به انجام یک کارکردی خاص در سطح مطلوب عملکرد نیست.
- حالت شکست:رویدادی که منجر به شکست کارکردی می‌شود، بطوری که نتواند کارکرد(ها) موردانتظار را انجام دهد.
- اثرات شکست : رویدادی که منجر به "آسیب" به کارخانه شود. در واقع پاسخ به این سوال که" وقتی که حالت شکست رخ می‌دهد، چه اتفاقی می‌افتد؟"

جهت آنالیز و ارزیابی ریسک‌ها از عدد RPN استفاده می شود. محاسبه عدد اولویت ریسک روشی برای تجزیه و تحلیل ریسک مرتبط با مشکلات احتمالی شناسایی شده در طی FMEA است در واقع این عدد یک رتبه بندی عددی از ریسک هر حالت (علت) ، احتمالی است که از حاصل ضرب سه عنصر تشکیل شده است: شدت اثر (S) ، احتمال وقوع علت (O) و احتمال کشف (تشخیص) علت (D) که طبق جداول ۳،۴و۵ امتیازدهی می شوند. در نهایت عدد اولویت ریسک (RPN) از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$RPN = S \times O \times D$$ رابطه (۱)

جدول شماره (۲): نمونه کاربرگ FMEA و آنالیز ریسک

زیر سیستم / قطعه	کارکرد سیستم / زیرسیستم	شکست کارکردی	حالت شکست (سطح اول)	حالت شکست (سطح دوم)	آثار شکست (خرابی)	شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	RPN / عدد ریسک	مشخصات دارایی / تجهیزات	دارای پیامد ایمنی و زیست‌محیطی	کدحالت‌شکست

جدول شماره (۳): شدت اثر خرابی

تاثیر	شدت اثر	امتیاز
بدون هشدار، مخرب و خطرناک	وقتی یک حالت خرابی احتمالی بدون هشدار که بر عملکرد سیستم ایمن تأثیر می گذارد	۱۰
با هشدار ، مخرب و خطرناک	وقتی یک حالت شکست بالقوه با هشدار ، عملکرد ایمن سیستم را تحت تأثیر قرار می دهد	۹
خیلی زیاد	خرابی سیستم با شکست مخرب، بدون به خطر انداختن ایمنی	۸
بالا	خرابی سیستم با آسیب دیدن تجهیزات	۷
در حد متوسط	خرابی سیستم با آسیب جزئی	۶
کم	خرابی سیستم بدون آسیب	۵

[15] Risk Priority Number

خیلی کم	سیستم با کاهش قابل توجهی از کارائی قابل کارکردن است	۴
جزئی	سیستم با کاهش کمی از کارائی قابل کارکردن است	۳
خیلی جزئی	سیستم با حداقل اختلال قابل کارکردن است	۲
هیچ یک	هیچ تاثیری ندارد	۱

جدول شماره (۴): احتمال کشف (تشخیص) خرابی

کشف	احتمال کشف (تشخیص)	امتیاز
عدم امکان	نمی توان علت / مکانیسم بالقوه و حالت خرابی متعاقب آن را تشخیص دهد	۱۰
خیلی بعید	خیلی بعید می توان علت / مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۹
بعید	بعید می توان علت / مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی نمود.	۸
خیلی کم	با شانس خیلی کمی می توان علت/مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۷
کم	با شانس کمی می توان علت / مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۶
متوسط	با شانس متوسطی می توان علت/مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۵
نسبتاً زیاد	با شانس متوسط به بالائی میتوان علت/مکانیسم بالقوه وحالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود	۴
بالا	شانس بالا برای می توان علت / مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۳
خیلی زیاد	با شانس بسیار زیادی می توان علت/مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۲
با اطمینان	به سادگی می توان علت/مکانیسم بالقوه و حالت شکست متعاقب را شناسایی و کشف نمود.	۱

جدول شماره (۵): تناوب خرابی

تناوب خرابی	توصیف تناوب خرابی	امتیاز
> ۱ در ۲	بسیار بالا: شکست تقریباً اجتناب ناپذیر است	۱۰
۱ در ۳		۹
۱ در ۸	بالا: شکستهای مکرر	۸
۱ در ۲۰		۷
۱ در ۸۰	متوسط: شکستهای گاه به گاه (اتفاقی)	۶
۱ در ۴۰۰		۵
۱ در ۲،۰۰۰		۴
۱ در ۱۵۰۰۰	کم: تعداد خرابی نسبتا کمی دارند	۳
۱ در ۱۵۰،۰۰۰		۲
<۱ در ۱،۵۰۰،۰۰۰	بعید: خرابی و بروز شکست بعید است	۱

در نهایت و در گام پنجم که فاز تحلیل بشمار می‌رود، بر مبانی خروجی مرحله قبل یعنی تحلیل شکستهاFMEA و با استفاده از نمودار تصمیم‌گیری RCM ،کاربرگ‌های اطلاعات و تصمیم‌گیری RCM تکمیل شد و در پایان برای هر یک از حالات شکست، استراتژی و فعالیت‌های مناسب نگهداری و تعمیرات با استفاده از تجربیات و نظر خبرگان) و اطلاعات و سوابق مربوط به تجهیزات تخصیص داده شد.پس از مشخص شدن حالات خرابی و اولویت‌بندی آنها، در مرحله نهائی به بررسی پیامدها و انتخاب استراتژی مناسب نت اقدام می‌شود و کاربرگهای RCM تهیه و تکمیل گردند. نمودار تصمیم‌گیری برای انتخاب مناسب‌ترین سیاست مدیریت پیامدها برای هر علت شکست توسط تیم تحلیل استفاده می‌شود. نمودار تصمیم‌گیری، هر علت شکست را با توجه به تأثیر آن بر اهداف سازمان (اهداف ایمنی، زیست محیطی و اهداف اقتصادی) و همچنین با توجه به شواهد شکستی، که توسط کارکنان بخش های بهره‌برداری و تعمیرات در حین عملیات عادی دیده می شود، راهنمایی می‌کند (Sifonte & Picknell, 2017).

این نمودار معمولاً برای تعیین نوع فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات متناسب با خرابی های مختلف استفاده می‌شود ، به طور کلی، چند اصل مهم وجود دارد که باید هنگام ایجاد یک برنامه نگهداری و تعمیرات ، مستقل از درخت تصمیم یا رویکرد مورد استفاده، حفظ شوند. اولاً، فعالیت های نت پیشنهادی باید قابل اجرا و موثر باشند، ثانیا فعالیتهای نگهداری باید مقرون به صرفه باشند.

بسیار بعید است که یک شرکت اگر هزینه های انجام فعالیت نگهداری و تعیمرات بالاتر از هزینه شکست باشد مایل به سرمایه گذاری در کارهای نگهداری و تعمیرات باشد. نمودار تصمیم‌گیری پیامدهای شکست را در سطح (ردیف) اول نمودار به چهار گروه تقسیم می‌کند که همانگونه که در شکل ۳ مشخص شده هر یک از این پیامدها با حروف H ، E،S و Oمشخص شده که به ترتیب H نشان دهنده آشکار(مشهود) بودن حالات شکست، S مشخص کننده پیامدهای ایمنی ،E پیامدهای زیست محیطی و نهایتاً O نشان دهنده پیامدهای عملیاتی است.در نمودار به این ترتیب عمل می‌شود که درصورتی پاسخ به این سوال که آیا پیامدهای یک حالت شکست برای کاربران قابل مشاهده و آشکار (H) می‌باشد؟ بلی باشد، در نمودار از ستون اول (سمت راست) برای تعیین فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب ، استفاده می‌گردد و در صورتی که جواب خیر باشد به ستون بعدی یعنی ستون مربوط به پیامدهای ایمنی(S) مراجعه نمود و در صورتی که جواب سوال این مطرح شده در ردیف اول این ستون، بلی باشد از ردیف‌های بعدی همین ستون جهت تعیین فعالیت مناسب نگهداری و تعمیرات استفاده می‌شود و به همین ترتیب کار ادامه می‌یابد، هر سطوح (ردیف) بعدی این نمودار مربوط به یک نوع از فعالیت های و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات است ، بدین ترتیب که سطح دوم مربوط به فعالیت‌های نت اقتضائی (کشف شکست) می باشد، سطح سوم فعالیت بازسازی زمانبندی شده ، سطح چهارم فعالیت از رده خارج کردن زمانبندی شده و سطح پنجم مربوط فعالیت‌های جستجوی شکست و در نهایت سطح شش این نمودار مربوط به فعالیت‌های بازطراحی و یا کارکرد تا شکست می‌باشد (Moubray, 1997). مواردی که جهت استفاده از نمودار تصمیم‌گیری و تکمیل کاربرگ RCM بایستی تعریف شوند جدول ۶ به شرح ذیل می‌باشد:

- پیامدهای شکست: اثرات یک حالت یا حالتهای شکست (شواهد شکست، تاثیرات ایمنی، محیط زیستی، تاثیر بر ظرفیت تولید و یا بر هزینه های مستقیم و غیر مستقیم تولید) را پیامدهای شکست گویند. در اینجا تنها بایستی تنها یک پیامد از حالات شکست مختلف که از همه شدیدتر است انتخاب شود . همچنین حالت های شکست پنهان و آشکار باید کاملاً از هم جدا شوند و شکست‌های که تاثیرات ایمنی یا زیست محیطی باید از مواردی که تنها تأثیر اقتصادی دارند و با آنهایی که اثرات عملیاتی یا غیر عملیاتی دارند متمایز شوند (Yssaad & Abene, 2017) (Sifonte & Picknell, 2016).

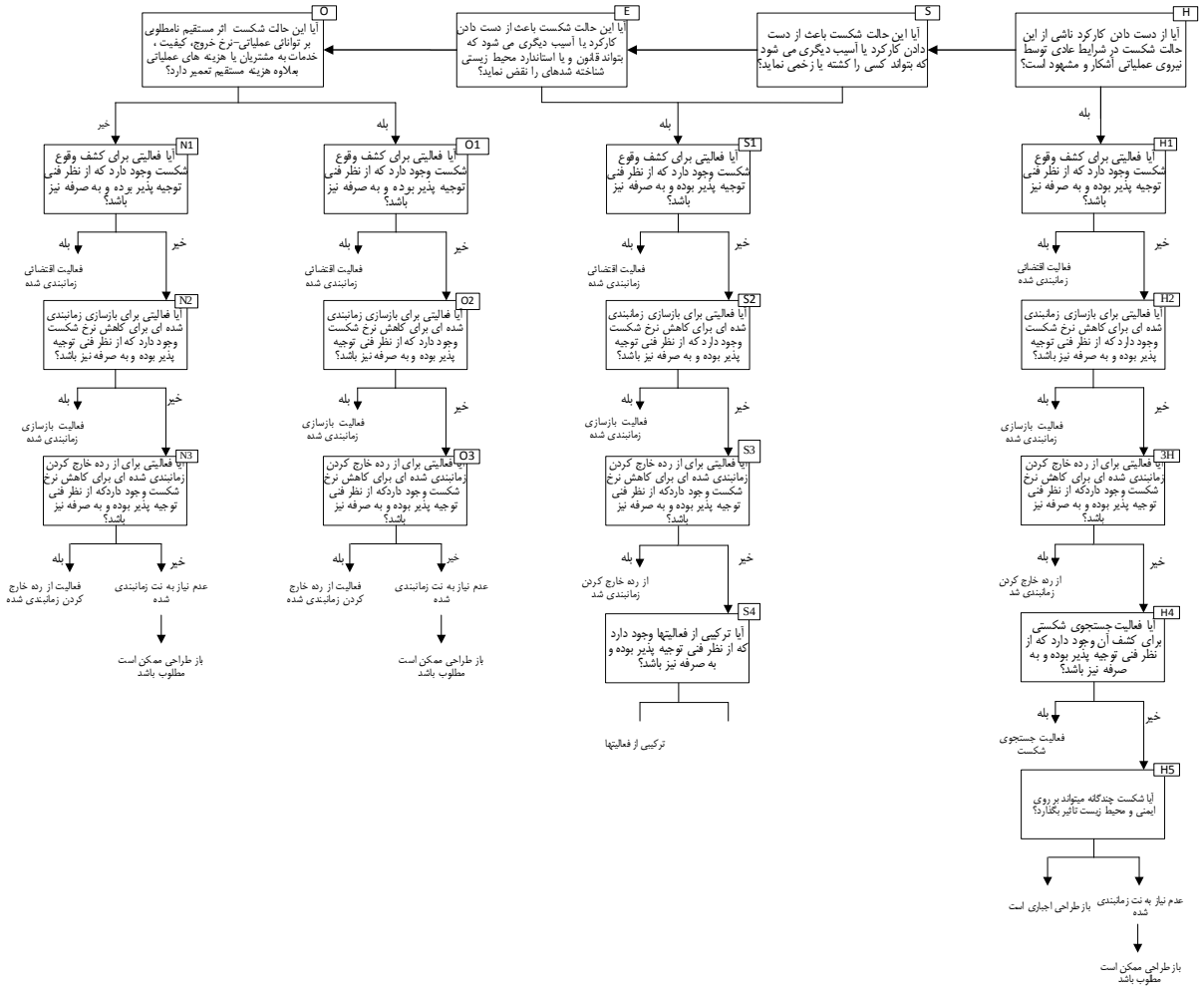
فرایند RCM این پیامدها را به چهار گروه طبقه بندی می‌کند ، که عبارتند از:

• پیامدهای شکست پنهان: این نوع شکست هیچ تأثیر مستقیمی ندارند ، اما سازمان را در معرض چندین شکست با عواقب جدی ، اغلب فاجعه بار قرار می‌دهند. اکثر این شکست‌ها در ارتباط با تجهیزات حفاظتی هستند که ایمن نیستند.

• پیامدهای ایمنی و محیط زیستی: شکست در صورت آسیب زدن یا فوت یک نفر، عواقب ایمنی دارد و اگر منجر به نقض هرگونه استاندارد زیست محیطی سازمانی ، منطقه ای ، ملی یا بین المللی شود ، پیامدهای زیست محیطی دارد.

• پیامدهای عملیاتی: شکست در صورتی که بر تولید (خروجی ، کیفیت محصول ، خدمات مشتری ، هزینه‌های عملیاتی علاوه بر هزینه مستقیم تعمیر) تاثیر بگذارد.

• پیامدهای غیر عملیاتی : شکست‌های که در این گروه قرار می‌گیرند ، بر ایمنی و تولید تأثیر نمی‌گذارد ، بنابراین آنها فقط هزینه مستقیم تعمیر را شامل می‌شوند (Moubray,1997).



شکل شماره (۳): نمودار تصمیم گیری (Moubray,1997)

جدول شماره (۶): نمونه کاربرگ اطلاعات و تصمیم گیری

کاربرگ تصمیم گیری RCM	سیستم : زیر سیستم: مجموعه پمپ												شماره سیستم: تاریخ: شماره زیر سیستم:		
مرجع اطلاعات : کاربرگ FMEA				کد شکست	ارزیابی پیامدها				فعالیتهای پیش اقدام			فعالیت های پیش اقدام			فعالیت نت پیشنهادی	فواصل زمانی	مجری
سیستم اثر بر سیستم	F	FF	FM		H	S	E	O	اقتضائی	بازسازی زمانبندی	از رده خارج کردن	H4	H5	S4			
									N1	N2	N3						
									O1	O2	O3						
									S1	S2	S3						
									H1	H2	H3						

برای پیاده سازی روش RCM ، ابتدا اجزای حیاتی از طریق قابلیت اطمینان و اثر حالت شکست و تجزیه و تحلیل (FMEA) خرابی بحرانی شناسایی می‌شوند. در نهایت، استراتژی های نگهداری برنامه ریزی شده و فواصل آنها برای اطمینان از ادامه عملکرد صحیح سیستم توصیه می شود.

۳-بحث و نتایج

الف) گام اول: مطالعات اولیه

در این گام با مشورت و نظر خواهی از کارشناسان و مسئولین ، مرحله سوم تولید (واحد تقطیر استر خام) را به عنوان مهمترین ترین واحد، جهت انجام تحقیق معرفی نمودند.

ب) گام دوم : تعیین تجهیز بحرانی

یک از مراحل اصلی این تحقیق اولویت‌بندی تجهیزات از لحاظ بحرانی بودن و تعیین یک از تجهیزات به عنوان تجهیز بحرانی جهت پیاده‌سازیRCM می باشد. فلذا نیاز است معیارهایی در اختیار داشته باشیم که در این خصوص یکی از بهترین گزینه‌ها استفاده از شاخص‌های عملکرد کلیدی (KPI) مرتبط با نگهداری و تعمیرات است که هم در استانداردهای نت موجود است و هم مرتبط با موضوع تحقیق است و هم ابزار بسیار مناسبی برای شناسائی و اطلاع از شرایط کنونی تجهیزات بشمار می‌رود. با توجه به تعدد این شاخص‌ها و تجهیزات از یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره یعنی روش تاپسیس گزینه مورد نظر از بین تجهیزات شناسائی می‌شود که در ادامه نحوه انتخاب بحرانی‌ترین تجهیز تشریح شده است.

ب-۱) تعیین و محاسبه KPIs مناسب برای بررسی تجهیزات واحد فرآیندی

در بسیاری از مراجع و تحقیقات انجام شده در زمینه نگهداری و تعمیرات ، از شاخص‌های کلیدی عملکرد به عنوانی معیاری جهت بررسی وضعیت تجهیزات استفاده می‌گردد و یکی از منابع معتبر در این زمینه استاندارد نگهداری و تعمیرات به شماره ISO14224 است که بخشی از این استاندارد به شاخص‌های کلیدی عملکرد اختصاص داده شده است . در این استاندارد کلیه موارد را از نظر گروه کاری، سطح کاربردی (سیستم، زیرسیستم و تجهیز) و نوع کاربرد تقسیم‌بندی نموده است. برخی شاخص‌ها در سطوح تجهیزات و سیستم / زیر سیستم که جهت انجام این مرحله از تحقیق مناسب می‌باشند با نظر خبرگان مشخص شدند با توجه به موضوع تحقیق شاخص مورد نظر بایستی در سطح تجهیزات باشد، ولی با توجه به تعدد این شاخص‌ها در استاندارد مذکور، و عدم امکان بررسی تمامی آنها فلذا تعدادی از آنها با در نظر گرفتن موارد ذیل انتخاب شدند:

- از لحاظ گروه‌ها و طبقه‌بندی انجام شده در استاندار و در نظر گرفتن اینکه شاخص مورد نظر بایستی در سطح «تجهیز» باشد.
- مرتبط بودن شاخص با قابلیت اطمینان و همچنین ایمنی و.... که با موضوع تحقیق نیز مطابقت داشته باشد.
- موجود بودن اطلاعات، سوابق و مستندات قبلی جهت محاسبه‌ی شاخص‌ها در شرکت مورد مطالعه (این شاخص‌ها باید از داده‌ها محاسبه شوند که می‌توانند به راحتی بدون و بدون هزینه زیاد جمع‌آوری شوند).

لذا با در نظر گرفتن موارد مطرح شده و همچنین با نظر خبرگان، شاخص‌های عملکرد کلیدی زیر به عنوان معیارهای مورد استفاده در روش تصمیم‌گیری چند معیاره، جهت اولویت‌بندی و انتخاب بحرانی‌ترین تجهیز مشخص شد :

۱- متوسط زمان بین خرابی‌ها (MTBF) ۲- متوسط زمان تعمیر(MTTR) ۳- دردسترس بودن عملیاتی (AVAILABILITY) ۴- هزینه‌های نگهداری و تعمیرات(MC :Maintenance Cost)

ب-۲) تعیین وزن شاخص های عملکرد کلیدی منتخب با استفاده از روش مقایسات زوجی

با توجه به اینکه جهت شناسائی تجهیز بحرانی از تکنیک تاپسیس استفاده می‌شود لذا برای این منظور ابتدا بایستی معیارها وزن دهی شوند از روش مقایسات زوجی استفاده شد و بر اساس ارجحیت هر شاخص نسبت به شاخص دیگر امتیاز دهی می شوند. سپس برای اوزان محاسبه شده آزمون سازگاری انجام می‌شود و در صورتی که سازگاری کمتر از ۱/. باشد نتایج مورد تایید قرار می‌گیرد. ماتریسی در اختیار خبرگان قرار داده شد و در طی جلسه‌ای بر روی اعداد ارجحیت هر شاخص نسبت به دیگری توافقی حاصل گردید و با استفاده از روش هیوریستیک آقای ساعتی وزن هر شاخص محاسبه شد ، سپس برای اوزان محاسبه شده تست سازگاری انجام شد که شاخص ناسازگاری آن طبق جدول ۷ برابر ۱/ . بدست آمد که بدین معنی است که اوزان محاسبه شده دارای ناسازگاری قابل قبولی هستند.

جدول شماره (۷): ماتریس مقایسات زوجی

نام معیارها	MTBF	MTTR	Availability	MC	وزن هر شاخص	شاخص سازگاری
MTBF	۱	۴	۱	$\frac{۱}{۳}$	W_{MTBF} =۰/۲۱۶	CI =۰/۱
MTTR	$\frac{۱}{۴}$	۱	$\frac{۱}{۵}$	$\frac{۱}{۴}$	W_{MTTR} =۰/۰۸	
Availability	۱	۵	۱	$\frac{۱}{۴}$	W_{Avail} =۰/۱۸۴	
MC	۳	۴	۴	۱	$W_{M.C}$ =۰/۵۲	

ب–۳) تعیین بحرانی‌ترین تجهیز به روش تصمیم‌گیری چندمعیاره(MCDM)

در این مرحله بحرانی‌ترین تجهیز در واحد مورد مطالعه مشخص می‌گردد. روش تصمیم‌گیری چند معیاره دارای تکنیک‌های مختلفی است که در این تحقیق و از تکنیک تاپسیس استفاده می‌گردد. تصمیم گیری چند معیاره داری دو مرحله است، در مرحله اول به روش مقایسات زوجی به هر یک از معیارها که در اینجا تحقیق معیارها «شاخص های کلیدی عملکرد» هستند وزن‌دهی می‌شوند و در ادامه با استفاده از روش تاپسیس گزینه مورد نظر از بین تجهیزات شناسائی می‌شود.

بنابراین جهت اولویت‌بندی و انتخاب بحرانی‌ترین تجهیز از بین ۲۱ عدد تجهیز–واحد مورد مطالعه ، از چهار معیار MTBF ، MTTR, Maintenance Cost, Availability به عنوان معیارها تصمیم گیری در تکنیک تاپسیس استفاده شده است، بر اساس مراحل روش تاپسیس محاسبات جهت مشخص کردن بحرانی‌ترین تجهیز انجام شد، که نتیجه ماتریس تصمیم‌گیری و نتیجه اولویت‌بندی تجهیزات در جدول شماره ۸ نمایش داده شده است.

جدول شماره (۸): ماتریس تصمیم‌گیری به روش تاپسیس جهت شناسائی بحرانی‌ترین تجهیز

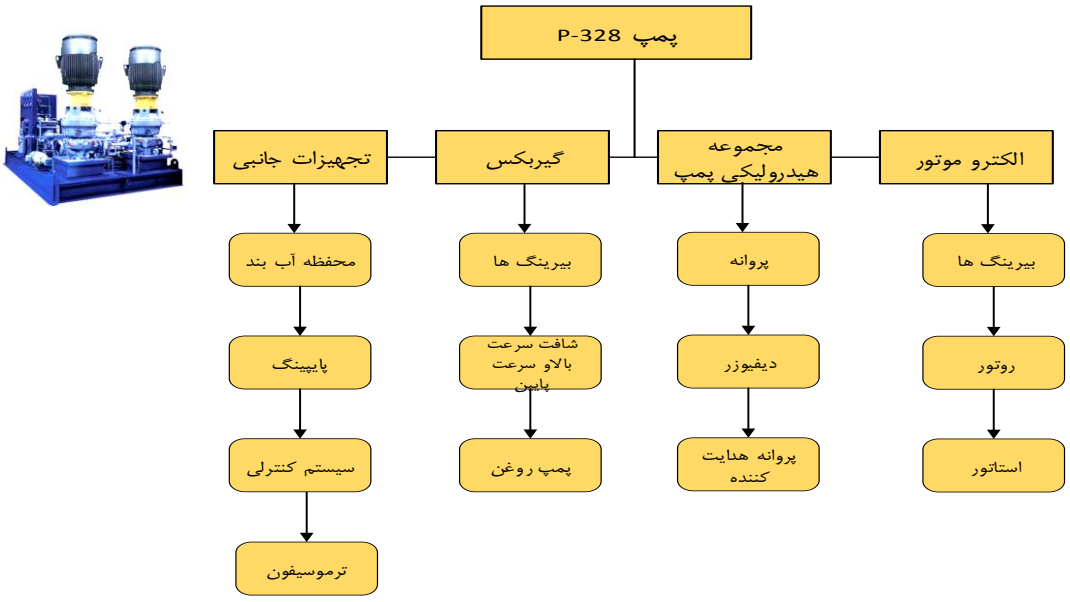
Wi : وزن معیار	۲۱۶/۰	۰۸/۰	۱۸۴/۰	۵۲/۰				
معیار	MTBF	MTTR	Avail.	Cost	S_i+	S_i-	c_i	**RANK**
نام/کد تجهیز								
A-350N	۱۰۴/۷۱	۲۰۸۲۱	۹۸/۵	۶۶۵۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۳	۲۰
A-365	۷۴۰	۴	۹۹/۵	۱۱۰۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۷
C-308M	۱۲۲/۳۳	۲۴۴۷۳	۹۸/۷	۴۶۰۰۰۰۰	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۳	۲۱
C-320	۱۰۱/۴۳	۳۱۵۰۳	۹۵/۴	۳۲۰۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۱۵	۱۸
C-390	۶۹	۴۵۷۸۱	۹۲/۷	۴۵۵۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۱۹	۱۴
P-311	۱۱۹/۱۷	۳۰۴۰۷	۹۶/۱	۲۰۰۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۴	۱۹
P-314M	۷۱۴	۳۰	۹۶	۱۸۵۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۴
P-316M	۷۳۷	۷	۹۹/۱	۱۲۵۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۸
P-319M	۲۳۴	۱۴	۹۴/۴	۵۳۱۵۰۰۰۰	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۴۲	۲
P-325	۲۴۵/۳۳	۲۴۵۰۴	۹۸/۹	۱۵۵۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۱۶	۱۶
P-326M	۱۴۲/۲	۴۵۸۱۴	۹۵/۶	۳۹۵۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۱۵	۱۷
P-328M	۶۵۳/۵	۹۰/۵	۸۷/۸	۱۱۰۳۵۰۰۰۰	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۸۷	۱
P-330M	۷۳۴	۱۰	۹۸/۷	۱۵۵۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۵
P-51N	۹۲/۴۳	۱۳/۸۶	۸۷	۸۱۵۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۲۸	۱۱
P-366M	۳۶۴/۵	۴۵۸۴۳	۹۸	۳۰۵۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۲۲	۱۲
P-381M	۷۳۴	۱۰	۹۸/۷	۱۴۰۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۶
P-381M	۹۱/۸۶	۱۴/۴۳	۸۶/۴	۸۰۰۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۲۹	۱۰
P-383	۱۷۴/۷۵	۴۵۹۸۶	۹۴	۴۸۵۰۰۰۰	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۱۸	۱۵
P-391 M	۲۳۳	۱۵	۹۴	۵۱۰۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۲	۱۳

P-391M	۷۴۰	۴	۹۹/۵	۹۵۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۹
P-396	۷۳۲	۱۲	۹۸/۴	۲۶۰۰۰۰۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۳۷	۳

پس از انجام محاسبات تصمیم‌گیری به روش تاپسیس و مرتب کردن آنها بر اساس C_i برای هر تجهیز، پمپ P-328 به عنوان بحرانی‌ترین تجهیز شناخته شده است.

ب-۴) معرفی پمپ P-328

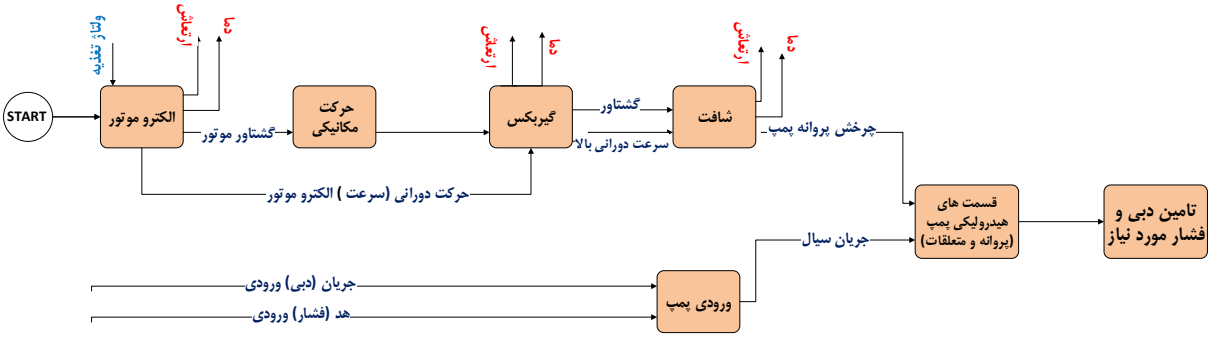
این پمپ‌ها در پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و نیروگاههای تولید برق و در فرآیندهای که به دبی و فشارهای بالای نیاز هست استفاده می‌شود. لذا با توجه به کاربرد آن و زیرسیستم‌ها و سیستم‌های جانبی آن از تجهیزات بسیار مهم بشمار می روند. شکل ۴ نمایش سلسله مراتبی درخت تجهیز پمپ P-328 شامل سیستم ها و زیرسیستم های پمپ است که همانطور که مشاهده می شود این پمپ دارای ۴ سیستم اصلی و ۱۳ زیرسیستم می‌باشد.



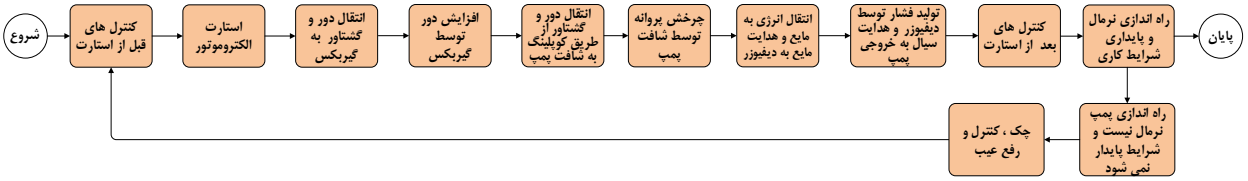
شکل شماره (۴): درخت سلسله مراتبی سیستم و زیر سیستم های P-328

ج) توصیف سیستم و رسم بلوک دیاگرام کارکردی پمپ P-328

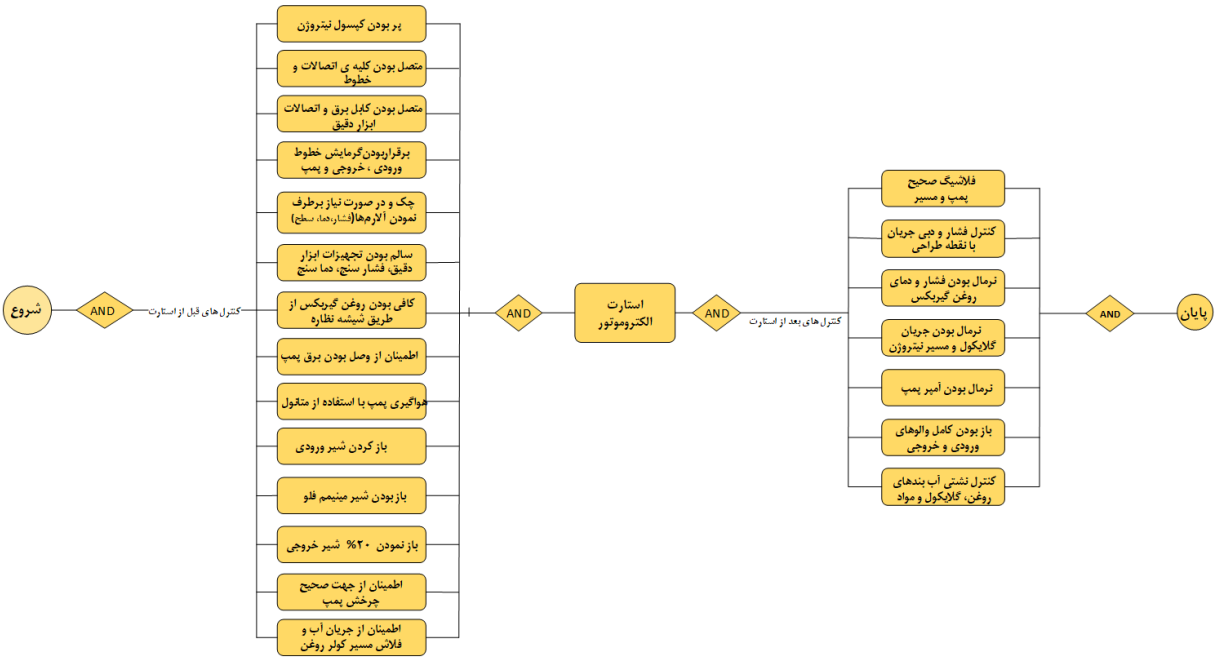
در این مرحله بایستی بلوک دیاگرام کارکردی یا FBD مربوط به تجهیز مشخص شده ترسیم گردد، تا تمام اطلاعات لازم درباره طراحی، مشخصه‌های کارکردی، الزامات سیستم، توصیف و تعریف کارکرد (های) جمع‌آوری شود.قبل از ترسیم FBD برای سیستم‌ها و تجهیزات زیرمجموعه پمپ P-328 لازم است ابتدا نحوه ی ارتباط آنها در پمپ در یک نمای کلی نمایش داده شود، برای این منظور نحوه‌ی ارتباط اجزا مختلف سیستم به همراه نمودار FBD کلی پمپ به عنوان یک سیستم واحد به ترتیب در شکلهای ۵ و ۶ نمایش داده شده است و در ادامه از نمودارهای نشا داده در شکلهای۷و۸ و۹ نمودار FBD کارکردهای مختلف تجهیزات و زیرمجموعه‌های پمپ نمایش داده شده است.



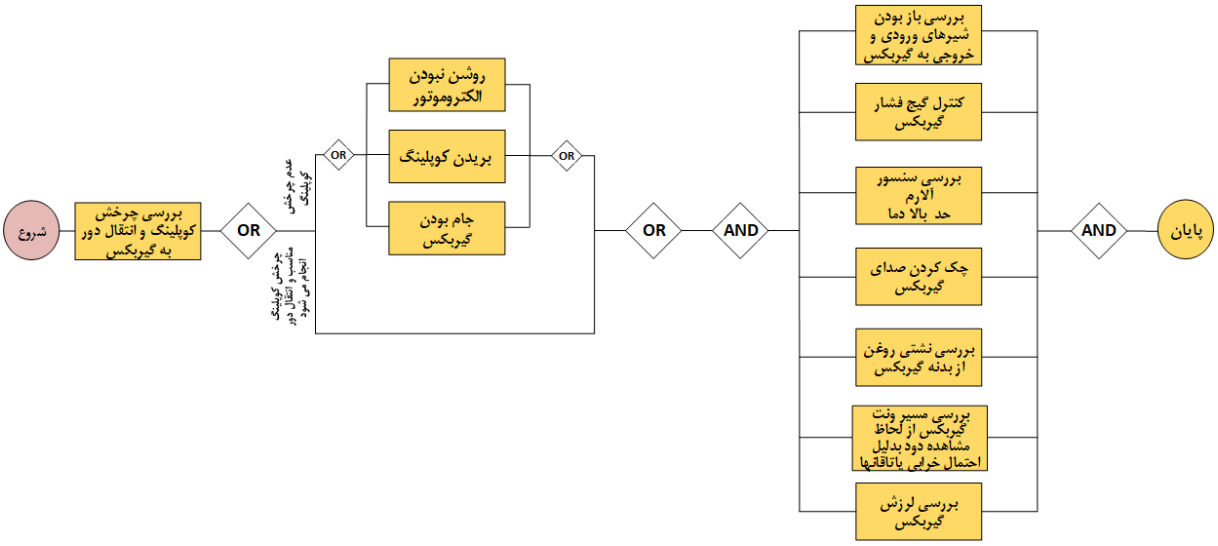
شکل شماره (۵): شمای کلی ارتباط سیستم‌ها و تجهیزات پمپ P-328



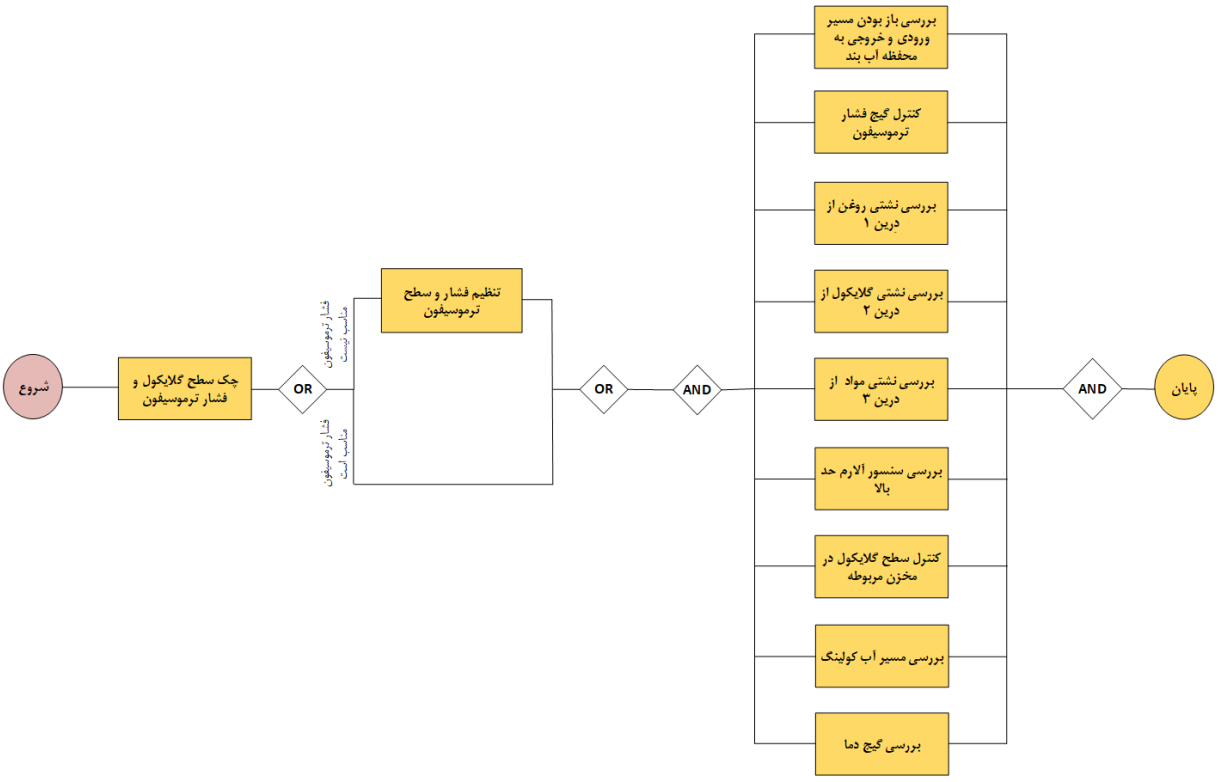
شکل شماره (۶): نمودار FBD کلی پمپ P-328



شکل شماره (۷): نمودار FBD مربوط به کنترلهای قبل و بعد از استارت پمپ P-328



شکل شماره (۸): نمودار FBD مربوط به گیربکس P-328



شکل شماره (۹): نمودار FBD مربوط به محفظه آب‌بند و ترموسیفون P-328

د) تجزیه و تحلیل حالت و اثرات شکست و تکمیل کاربرگ FMEA و ارزیابی ریسک

جهت تجزیه و تحلیل حالت و اثرات شکست ،کاربرگ FMEA طراحی شد، این کاربرگ بر اساس نمودارهای بلوکی کارکردی (FBD) که برای پمپ P-328 در مرحله قبل برای سیستم و زیرسیستم آن ترسیم شد، توسط خبرگان تکمیل شده است . در این مرحله خبرگان بایستی اطلاعاتی نظیر، کارکردها ، شکست‌های کارکردی، حالات شکست ، پیامدهای شکست را وارد نمایند و همچنین طبق توضحات قبلی اقدام به ارزیابی ریسک جهت تعیین خرابی های بحرانی با تعیین عدد RPN نمایند که جدول ۹ به عنوان نمونه کاربرگ FMEA و آنالیز ریسک برای مجموعه داخلی پمپ آورده شده است. .در مجموع ۱۸۶ حالت

شکست برای پمپ P-328 با استفاده از FMEA توسط خبرگان جهت ارزیابی ریسک شناسایی شد..

طبق ارزیابی شکست‌ها در جداول ۹ بالاترین و پایین‌ترین عدد RPN به ترتیب ۲۵۲ و ۴ می‌باشد که خرابی شکستن پروانه پمپ بالاترین امتیاز RPN را داشت و کاویتاسیون بدلیل نشت هوا پائین‌ترین عدد RPN را دارا می‌باشد. جهت انجام مرحله بعد با توجه به پراکندگی اعداد ریسک و همچنین تمرکز بر شکستهای مهم و بدلیل اینکه برخی شکست‌ها تأثیر کمتری در کل فرآیند داشتند، با توافق خبرگان شکست‌هائی کهRPN آنها بالاتر از میانگین عددی کل RPNها است برای مراحل بعدی انتخاب شدند. که این میانگین کل برابر است با RPN=41 بنابرین از مجموع ۱۸۶ عدد حالت شکست تعداد ۴۵ حالت شکست دارای عدد RPN بالاتر از متوسط هستند.

جدول شماره (۹): کاربرگ FMEA و آنالیز ریسک– مجموعه پمپ (PF)

زیر سیستم / قطعه	کارکرد سیستم / زیرسیستم	شکست کارکردی	حالت شکست (سطح اول)	حالت شکست (سطح دوم)	آثار شکست(خرابی)	شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	RPN / عدد ریسک	منتخب ماتریس ریسک	دارای پیامد ایمنی و زیست‌محیطی	کد حالت‌شکست
مجموعه پمپ	تامین دبی طبق نقطه طراحی	عدم تامین دبی و فشار طبق نقطه طراحی	پمپ اماده سازی و راه اندازی نشده	خطای تکنسین تولید	عدم چرخش موتور وانتقال دور	۵	۵	۱	۲۵			PF-001
			برگشت مایع به مسیر ورودی	خرابی چک ولو	پمپ خروجی ندارد	۶	۵	۱	۳۰			PF-002
			بسته بودن شیر مکش	خطای تکنسین تولید	پمپ خروجی ندارد	۶	۵	۱	۳۰			PF-003
			بسته بودن شیر خروجی (تخلیه)	خطای تکنسین تولید	افزایش ناگهانی آمپر	۶	۵	۱	۳۰			PF-004
			مسدود بودن لوله مکش	هیتینگ مربوطه قطع شده است.	پمپ خروجی ندارد	۶	۵	۱	۳۰			PF-005
			مسدود بودن لوله خروجی	خطای تکنسین تولید	افزایش ناگهانی آمپر	۶	۵	۱	۳۰			PF-006
			موجود بسیار کم است NPSH	خطای طراح در طراحی اولیه	عدم برقراری جریان	۶	۱	۲	۱۲			PF-007
			کاویتاسیون ۱	کاهش فشار در لوله مکش پمپ	سر و صدا بدلیل کاویتاسیون	۶	۲	۱	۱۲			PF-008
				. . . . .								
	تامین فشار طبق نقطه طراحی	فشار نامناسب	خطای وسایل اندازه گیری و ابزار دقیق (فشارسنج)	---	نمایش اشتباه مقادیر	۷	۶	۵	۲۱۰	*		PF-041
			دبی جریان زیاد است.	---	مقدار عدد فلو متر	۵	۲	۱	۱۰			PF-042
			جهت غلط چرخش شافت محرک	---	افت کارایی سیستم	۵	۲	۲	۲۰			PF-043

		NPSHموجود پایین تر از NPSH مورد نیاز	خطای طراحی	کاویتا سیون و تخریب قطعات	۹	۱	۱	۹		PF-044
	عدم تامین دبی و فشار و نشتی پمپ	پاس داشتن آب‌بند مکانیکی	محفظه آب بند آسیب‌دیده	عمر کوتاه آب بند	۸	۳	۲	۴۸	*	PF-055
			سطح شافت پمپ آسیب دیده	عمر کوتاه آب بند	۸	۳	۲	۴۸	*	PF-056
			نصب نادرست آب بند	لرزش زیاد	۸	۳	۱	۲۴	*	PF-057
			سایش و تخریب آب بند	عمر کوتاه آب بند	۸	۳	۲	۴۸	*	PF-058
			. . .							

در روند تحلیل شکستها ، شکستهای بحرانی با استفاده از عددRPN مشخص می‌شوند ولی به دلیل موارد تشریح شده در بخش سوم علاوه بر عددRPN جهت شناسائی شکست‌های بحرانی از ماتریس ریسک نیز استفاده می‌شود که برای این منظور از دو عدد شدت و احتمال وقوع، استفاده می‌گردد. شکست‌هایی که در ماتریس در ناحیه‌ی قرمز رنگ قرار گرفتند در ستونهای آخرین جداولFMEA (جدول۹) مشخص شده‌اند. ماتریس ریسک ترسیم شده برای حالتهای شکست پمپ P– 328 در شکل ۱۱نمایش داده شده است. که احتمال وقوع حالت شکست در محور Y رسم شده‌است در حالی که شدت حالت شکست در محور Xترسیم شده‌است. ماتریس برگرفته از درجه‌بندی، توصیف و معیار های جداول FMEA که در مرحله قبل تکمیل شدند، می‌باشد. در ماتریس 2x2 ریسک، ریسکهای پایین ناحیه سبز رنگ است، ریسک نیمه بحرانی زرد رنگ است و شکستهای با ریسک بالا در ناحیه قرمز رنگ نشان داده شده است. طبق نظر خبرگان و با توجه به حساسیت و اهمیت تجهیز مورد مطالعه کلیه ریسکهای بحرانی و نیمه بحرانی یعنی نواحی قرمز و زرد رنگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. همانگونه که در ماتریس ریسک که هر حالت شکست را با کد مربوطه، نمایش داده شده،(شکل ۱۰) مشخص است، تعداد ۱۰۳ حالت شکست دارای ریسک بحرانی و نیمه بحرانی در ناحیه قرمز و زرد ماتریس ریسک قرار دارند. با توجه به مقایسه شکست‌ها در ماتریس ریسک و عدد RPNهای مشخص شده برای هر حالت شکست در کاربرگ FMEA و حذف موارد مشترک آنها، تعداد ۶۵ حالت شکست بایستی به مواردی که برای مرحله بعدی ارسال می‌شوند، اضافه گردد، در نتیجه تعداد ۴۵ عدد از کاربرگFMEA بعلاوه ۶۵ عدد خروجی ماتریس ریسک، یعنی جمعاً تعداد ۱۱۰ عدد حالت شکست برای مرحله بعدی ارسال می گردد.

احتمال وقوع خرابی					
5					
4					
3		PF-012,	EF-014, EF-015, PF-001, PF-002, PF-003, PF-004, PF-005, PF-006, PF-009, PF-030, PF-031, PF-032, PF-033, PF-034, PF-035, PF-041, SF-020,	GF-026, PF-014, PF-025, SF-002, SF-013, SF-014, SF-021, SF-004, SF-027,	
2		PF-011, EF-008, EF-016, PF-016, PF-036, SF-017, SF-018, SF-019	EF-003, EF-004, EF-009, EF-011, EF-012, EF-018, GF-001, GF-002, GF-006, GF-008, GF-017, GF-047, HF-001, HF-007, HF-008, HF-012, HF-014, HF-031, HF-034, , PF-010, PF-021, PF-022, PF-023, PF-024, PF-026, PF-029, PF-042, PF-043,	, GF-023, GF-024, GF-025, GF-027, GF-028, GF-035, PF-015, PF-017, PF-018, PF-019, PF-020, PF-054, PF-055, PF-056, PF-057, PF-058, SF-003, SF-008, SF-022,	
1	EF-017	PF-039 PF-045 GF-012	PF-007, PF-013, PF-037, PF-038, , PF-050, PF-051, PF-052, GF-003, GF-004, GF-005, GF-007, GF-009, GF-010, GF-011, GF-013, GF-014, GF-015, GF-016, GF-018, GF-019, GF-020, GF-021, GF-022, GF-034, GF-036, GF-037, GF-038, GF-039, GF-041, GF-043, GF-044, GF-045, GF-046, GF-048, SF005,	PF-027, PF-028, PF-044, PF-059, GF-029, GF-030, GF-031, GF-032, GF-033, GF-040, GF-042, HF-009, HF-015, HF-016, HF-023, HF-024, HF-025, HF-026, EF-007, EF-013,	
	1	2	3	4	5
	Very Low	Low	Moderate	High	Very High
	شدت خرابی				

شکل شماره (۱۰): ماتریس ریسک جهت شناسائی شکست های بحرانی

با بررسی انجام گرفته در مجموع تعداد ۱۸۶ مورد خرابی برای پمپP-328 توسط خبرگان مشخص شد که از این تعداد ۱۱۰ حالت شکست در مرحله تجزیه و تحلیل FMEA با استفاده از عدد ریسک و همچنین ماتریس ریسک بحرانی شناخته شدند و ۳ مورد حالت شکست نیز دارای پیامدهای ایمنی ، زیست محیطی بودند که در کل تعداد ۱۱۳ حالت شکست به عنوان حالات شکست بحرانی شناخته شدند

ه) تکمیل کاربرگ طلاعات و تصمیم‌گیری RCM

پس از تکمیل کاربرگFMEA و تعیین پیامدهای مشخص شده برای حالات مختلف شکست در کاربرگ اطلاعات RCM برای پمپP-328، مرحله بعدی تکمیل کاربرگ تصمیم گیری RCM برای زیرسیستم‌های مختلف پمپ مذکور است تا ماهیت پنهان، ایمنی، محیط زیست و عملیاتی شکست‌ها آشکار شوند. این کاربرگ برای ثبت پاسخ به سوالات موجود در نمودار تصمیم‌گیری است و بر اساس نظر خبرگان در مواردی برای شکست‌های معمولی نگهداری و تعمیر روتین و برای شکست‌ها بسیار مهم طراحی مجدد پیشنهاد شده است و در برخی موارد با تصمیم آگاهانه اجازه کارکردن تجهیز تا وقوع شکست اتخاذ شده‌است. که نتایج در خصوص تجهیز مورد مطالعه در جدول ۱۰ قابل مشاهده است:

جدول شماره (۱۰): کاربرگ اطلاعات و تصمیم گیری RCM – مجموعه پمپ (PF)

کاربرگ تصمیم گیری RCM			سیستم: P-328 زیر سیستم: مجموعه پمپ														شماره سیستم: شماره زیر سیستم:		تاریخ:
مرجع اطلاعات : کاربرگ FMEA			کد شکست	ارزیابی پیامدها							فعالیتهای پیش اقدام			فعالیتهای پیش اقدام			فعالیت نت پیشنهادی	فواصل زمانی	مجری
											بازسازی زمان بندی شده، از رده خارج کردن	بازسازی زمان‌بندی	اقتضائی						
											H3	H2	H1						
											S3	S2	S1						
											O3	O2	O1						
سیستم /زیرسیستم	F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4						
مجموعه پمپ	تامین دبی و فشار طبق نقطه طراحی	عدم تامین دبی و فشار طبق نقطه طراحی	پمپ اماده سازی و راه اندازی نشده	Y	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده(تست عملکرد)	روزانه	تکنسین تولید
			برگشت مایع به مسیر ورودی	N	N	N	N	N	N	N	Y	N	N				جستجوی شکست	سه ماهه	کارشناس طراحی
			بسته بودن شیر مکش	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (چشمی)	روزانه	تکنسین تولید
			بسته بودن شیر خروجی (تخلیه)	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (آمیز سنجی)	روزانه	تکنسین تولید
			مسدود بودن لوله مکش	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (ترموگرافی)	ماهیانه	تکنسین بازرسی
			مسدود بودن لوله خروجی	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (پایش فشار و دبی)	ماهیانه	تکنسین بازرسی
			کاویتاسیون ۱	N	N	N	Y	N	N	N	N	Y	N				باز طراحی	---	کارشناس طراحی
			خرابی موتور	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (تست عملکرد)	شش ماهه	تکنسین برق
			پروانه که به وسیله جسم خارجی جام شده	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (تست عملکرد)	شش ماهه	تکنسین مکانیک
			پروانه متوقف شده	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (پایش فشار و دبی و آمپر)	روزانه	تکنسین تولید
			مخزن / تانک تغذیه خالی است و هیچ مایعی در لوله ورودی وجود ندارد	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (پایش فشار و دبی و آمپر)	روزانه	تکنسین تولید
			دیفیوزر تخریب شده	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (PT تست)	شش ماهه	تکنسین بازرسی
			کوپلینگ شکسته شده	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				بازسازی زمانبندی	روزانه	تکنسین مکانیک
			بلبرینگ در هوزینگ گریپاز کرده	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده(تست عملکرد)	ماهیانه	تکنسین بازرسی
			بلبرینگ در موتور گریپاز کرده	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده(تست عملکرد)	ماهیانه	تکنسین بازرسی
			از دست دادن برق موتور	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	N				بازرسی زمانبندی شده (آمپر سنجی و تست ولتاژ)	روزانه	تکنسین تولید

همانطور که در جدول ۱۰ نشان داده شده است ، کاربرگ تصمیم‌گیری RCM برای حالت‌های شکست بر اساس نمودار تصمیم‌گیری(شکل۳) با نظر خبرگان تکمیل شد و شناسایی شدند. یکی مهم‌ترین قسمت این کاربرگ تخصیص فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب و زمان‌بندی آن فعالیتها و در نهایت دسته‌بندی آنها که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

برای هر یک از حالت‌های شکست با توجه به پیامدهای ایمنی، زیست محیطی، عملیاتی و غیرعملیاتی که هر یک از حالات شکست دارند و با استفاده از تجربیات و دانش خبرگان، برنامه نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر یک از ردیف‌های کاربرگ تصمیم‌گیری ارائه شد ، این فعالیت‌ها شامل: نگهداری و تعمیرات اقتضائی، بازسازی زمان بندی شده، از رده خارج کردن زمان بندی شده، فعالیت‌های جستجوی شکست، باز طراحی و کارکرد تا شکست می‌باشد.

و) یافته های تحقیق

در حال حاضر در بسیاری از صنایع کشور و از جمله صنعت مورد مطالعه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس رویکرد کارکرد تا خرابی می‌باشد که خود باعث افزایش هزینه‌های تولید و قیمت تمام شده‌ی محصول می‌گردد، بنابراین بایستی در نگرش صنایع به مقوله‌ی نگهداری و تعمیرات ، تغییرات جدی و اساسی ایجاد شود، که یکی از مهمترین رویکردهایی که بدین منظور می‌توان استفاده نمود ، نت مبتنی بر قابلیت اطمینان است که این رویکرد به نحوی تمامی روش‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات را در خود جای داده است، لذا در این تحقیق سعی شد رویکرد مذکور به عنوان نمونه در یکی از واحدهای شرکت مورد مطالعه پیاده سازی و عملیاتی گردد، در این راستا پس از مرور ادبیات تحقیق ، طبق روش و مراحل ارائه شده در بخش دوم ، در گام دوم و سوم با استفاده از برخی شاخص‌های عملکرد کلیدی نگهداری و تعمیرات و بکارگیری یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره یعنی تاپسیس ، ابتدا تجهیزات واحد مورد مطالعه از لحاظ بحرانی بودن اولویت بندی شدند و از بین آنها پمپP-328 به عنوان بحرانی‌ترین تجهیز آن واحد، شناسائی شد و در گام بعدی نمودارهای بلوکی کارکردی برای پمپ مورد نظر ترسیم شد و بر اساس نمودارهای مربوطه ، کاربرگ FMEA و آنالیز ریسک تهیه و اطلاعاتی نظیر کارکردها ، شکست‌های کارکردی ، شکست ها و .... و عد توسط خبرگان تکمیل شد سپس که با استفاده از عددRPN و ماتریس ریسک ، خرابی‌ها و حالتهای شکست اولویت‌بندی و بحرانی‌ترین آنها برای انجام مراحل بعد مشخص شدند که تعداد ۱۸۶ مورد شکست برای کل سیستم‌ها و زیر سیستم‌های پمپ مذکور شناسائی شد که از کل شکست‌ها تعداد ۱۱۳ مورد بعنوان شکستهای بحرانی مشخص شدند و در

ادامه و در گام بعدی کاربرگ‌های اطلاعات و تصمیم گیری RCM که شامل مواردی مانند نوع شکست (آشکار و پنهان) و همچنین فعالیت‌های نت مانند پیش اقدام و پیش فرض که به طور کامل در بخش سوم توضیح داده شد، بر اساس نمودار تصمیم‌گیری تکمیل شد و در پایان و در گام نهایی به دسته‌بندی، تحلیل و زمان بندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس کاربرگ‌های مذکور، اقدام شد، که با توجه به دسته‌بندی انجام شده : نت اقتضائی ۶۹٪ از فعالیتها را به خود اختصاص داده سپس به ترتیب بازسازی زمان‌بندی شده ۱۰ ٪ ، جستجوی شکست ۵ ٪ ، از رده خارج کردن زمان‌بندی شده ۷ ٪ ، باز طراحی ۷ ٪ و کارکرد تا شکست به میزان ۲ ٪ فعالیت‌های نت را شامل می‌شوند. در ادامه و در این قسمت به بحث و نتیجه‌گیری و نکات برجسته بطور خلاصه ارائه می‌گردد.

تحقیق حاضر نشان داد یکی از روشهایی که میتوان برای اولویت بندی تجهیزات انتخاب نمود روشهای کمی است که در این تحقیق جهت انتخاب بحرانی‌ترین تجهیز از مقادیر KPIs های نگهداری و تعمیرات استفاده شد که هر KPI با روش مشخصی وزن‌دهی شد و با استفاده از یکی از تکنیک‌های تصمیم گیری چند معیاره یعنی تاپسیس همانگونه که در جدول ۴-۳ قابل مشاهده است بحرانی‌ترین تجهیز شناسائی شد .

همچنین میتوان با کمک تجزیه و تحلیل حالت شکست و اثرات آن(FMEA) حالات مختلف خرابی را برای تجهیز بحرانی مورد نظر شناسائی کرد. برای این منظور ابتدا نمودار FBD برای تجهیز مورد نظر ترسیم و بر اساس آن کاربرگ FMEA که حاوی اطلاعاتی در مورد شکست‌ها حالات شکست و .... تکمیل می‌شود و با کمک آنالیز ریسک خرابی‌های بحرانی را مشخص و اولویت‌بندی نمود که جهت اولویت بندی خرابی ها از عدد اولویت ریسک (RPN) استفاده شد کلیه حالات خرابی براساس بالاترین عدد مرتب شدند، که با نظر خبرگان حالات شکستی که عدد RPN ان از میانگین پائین‌تر بودند حذف شدند در اقدام بعدی با توجه به اهمیت موارد ایمنی آیتم‌ها حذف شده‌ای که دارای پیامد ایمنی بودند و همین‌طور آنهائی که در ماتریس ریسک در ناحیه بحرانی (قرمز رنگ) قرار داشتند، به لیست حالات شکست بحرانی اضافه شدند.

در ادامه با استفاده از فرآیند RCM می‌توان استراتژی مناسب نت را برای هر یک از خرابی‌های بحرانی انتخاب شد ، برای این منظور پس از انجام تجزیه و تحلیل FMEA و شناسائی خرابی‌های بحرانی با استفاده از عدد RPN، کاربرگ‌های اطلاعات و تصمیم گیریRCM که با در نظر گرفتن نمودار تصمیم‌گیری تکمیل می‌گردند، در این خصوص بایستی کلیه مراحل گام به گام طبق آنچه در بخش سوم اشاره شد، انجام شود و در نهایت استراتژی مناسب برای هر حالت شکست انتخاب می‌گردد.

پس از انتخاب یکی از واحدهای تولید شرکت مورد مطالعه ، جهت پیاده‌سازی رویکرد RCM گام‌هایی که قبلا در بخش ۳ تشریح شد، به ترتیب انجام داد. که به صورت کلی بشرح ذیل می‌باشد:

- انتخاب تجهیز بحرانی: اولین و مهمترین مرحله پیاده سازی RCM در این پژوهش است که با توجه به تعدد تجهیزات، با استفاده از شاخص‌های کلیدی عملکرد و بکارگیری روش تصمیم‌گیری چند معیاره تجهیز مورد نظر انتخاب می‌گردد. که در این تحقیق از تکنیک تاپسیس استفاده شد و از بین تجهیزات مورد مطالعه، پمپ P-328 بعنوان بحرانی‌ترین تجهیز شناسائی شد.

- ترسیم نمودار FBD: پس از مشخص شدن تجهیز بحرانی، جهت شناسائی شکستها و خرابی‌ها کارکردی و تحلیل آنها لازم است بلوک دیاگرام کارکردی تجهیز و زیرسیستم‌های مربوطه ترسیم گردد. که این نمودارها در بخش چهارم این تحقیق برای سیستم‌ها و زیر سیستم‌های تجهیز منتخب در این تحقیق یعنی پمپ P-328 ترسیم شدند.

- تجزیه و تحلیل FMEA و حالات خرابی و اولویت‌بندی و مشخص نمودن بحرانی‌ترین شکست‌ها : در ادامه روند تحقیق و پس از ترسیم دیاگرامهای کارکردی کلیه خرابی‌های محتمل لیست می‌شوند و با استفاده از روش‌های ریسک اقدام به اولویت‌بندی و شناسائی شکستهای بحرانی می‌شود، این مرحله در قالب تکمیل کاربرگFMEA انجام می‌شود که در این تحقیق تعداد ۱۸۶ مورد خرابی برای پمپP-328 شناسائی شد که از این تعداد با استفاده از عدد اولویت ریسک و ماتریس ریسک تعداد ۱۱۳ مورد از شکستها (چیزی حدود ۶۰ درصد) به عنوان شکستهای بحرانی شناخته شدند.

- تکمیل کاربرگهای RCM: تکمیل کاربرگRCM مهمترین بخش از روند کار است، در این مرحله به کلیه خرابی‌ها بر اساس نمودار تصمیم‌گیری فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب همراه با زمانبندی مربوطه، اختصاص داده می‌شود. کاربرگهای مذکور برای تجهیز منتخب بر طبق نمودار تصمیم‌گیری ارائه شده در بخش قبل تکمیل شد که نتایج در قالب جدول ۱۰ قابل مشاهده

است، در این قسمت به کلیه شکست‌های بحرانی فعالیت‌های مناسب نگهداری و تعمیراتی همراه با زمانبندی مربوط تخصیص و اقدام کننده‌ی و مجری آنها مشخص گردیده شد.

– دسته‌بندی،تحلیل و زمانبندی فعالیت‌ها و اقدامات نگهداری و تعمیرات: در مرحله پایانی کلیه شکستها به تفکیک نوع فعالیت نگهداری و تعمیرات اختصاص داده شده شامل نگهداری و تعمیرات اقتضائی، بازسازی زمان بندی شده، از رده خارج کردن زمان بندی شده ، فعالیت‌های جستجوی شکست، باز طراحی و کارکرد تا شکست جهت پیاده سازی مرتب می‌گردند. بیشترین حجم فعالیت‌ها مربوط به نت اقتضائی است به میزان ۶۹ ٪ سپس به ترتیب بازسازی زمان‌بندی شده ۱۰ ٪ ، جستجوی شکست۵ ٪ ، از رده خارج کردن زمان‌بندی شده ۷ ٪ ، باز طراحی ۷ ٪ و کمترین مقدار مربوط به کارکرد تا شکست به میزان ۲ ٪ می‌باشد.

٤- منابع

Afzali, P., Keynia, F., & Rashidinejad, M. (2019). A new model for reliability-centered maintenance prioritization of distribution feeders. *Energy, 171*, 701–709. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.040

Aghnia Mehdi, Lotfi Jalal Abadi, M. (2016). Identifying effective components for implementing reliability centered maintenance in an aviation organization. *Journal of Aeronautical Engineering, 18*(2), 26-39.

Alta, E., Putri, N., & Henmaidi, H. (2020). Reliability Centered Maintenance of Mining Equipment: A Case Study in Mining of a Cement Plant Industry. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0950-6_26

Arno, R., Dowling, N., & Schuerger, R. (2015). Equipment failure characteristics & RCM for optimizing maintenance cost. *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, 1–8. https://doi.org/10.1109/ICPS.2015.7266415

Eriksen, S., Utne, I. B., & Lützen, M. (2021). An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships. *Reliability Engineering & System Safety, 210*, Article 107550. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107550

Esmaeil Alizadeh, Aghaei, A., & Aghaei, M. (2019). Reliability-based maintenance and repair cost optimization model for ground-based machinery. *Resource management in law enforcement, 27*, 203-228.

Gupta, G. and Mishra, R.P. (2016). A SWOT analysis of reliability centered maintenance framework. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 22*(2), 130-145. https://doi.org/10.1108/JQME-01-2015-0002

Gupta, G., & Mishra, R. (2018). Identification of Critical Components Using ANP for Implementation of Reliability Centered Maintenance. *Procedia CIRP, 69*, 905–909. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.122

Mejia-Portillo, E., Guevara-Barrera, S.., Aguilar-Rosa, J.., & Rodriguez-Gallo, Y. (2025). Implementation of a Reliability-Centered Maintenance Plan for Fire-Tube Boilers: A Case Study in the Textile Industry. *IEEE Latin America Transactions, 23*(2), 104–113. Retrieved from https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/9225

Mohammad Safipoor, Mohsen Mohammadizadeh, (2019). Evaluation of Support Systems and Maintenance of Machinery for Road Construction and Construction Projects. *Journal of Development Evolution Management, 10*(35), 67-75. Retrieved from magiran.com/p1941744

Moradi-Sarvestani, S., Dehbozorgi, M. R., & Rastegar, M. (2024). A three-stage reliability-centered framework for critical feeder identification, failure modes prioritization, and optimal maintenance strategy assignment in power distribution system. *Electric Power Systems Research, 230*, 110215. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110215

Moubray, J. (1997). *Reliability centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press Inc,U.S , South Norwalk.

Nasri, M. H., Derakhshandeh, S. Y., & Kargar, A. (2020). A Systematic Look at the Application of RCM Method to Lines Distance Protection System. *Computational Intelligence In Electrical Engineering (Intelligent Systems In Electrical Engineering), 11*(1), 43-62. Retrieved from SID

Patil, S. S., Bewoor, A. K., Kumar, R., Ahmadi, M. H., Sharifpur, M., & PraveenKumar, S. (2022). Development of Optimized Maintenance Program for a Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach. *Sustainability, 14*(16), 10073. https://doi.org/10.3390/su141610073

Piasson, D., Bíscaro, A. A. P., Leão, F. B., & Mantovani, J. R. S. (2016). A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multi objective genetic algorithm. *Electric Power Systems Research, 137*, 41–50.

Salehian, Z., & Jahan, A. (2022). Establishing a Reliability-based Maintenance methodology in a Gas Pressure Reduction System. *System Engineering and Productivity, 1*(1), 121-136.

Salempour, A., & Hamidpour, H. (2015). *Investigation of the establishment of reliability centered maintenance (RCM) for machinery in Iranian road construction projects*. 3rd International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran. Retrieved from https://civilica.com/doc/469354

Seyed Hosseini, S. M., Shahanaghi, K., & Shasfand, S. (2024). Functional Model of Integrated Maintenance in Petrochemical Industries. *International Journal of Engineering, 37*(6), 1106-1117. https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.06c.07

Shafiei Nikabadi, M., Faraj Pourkhanapashtani, H., Eftekhari, H., & Saadabadi, A. A. (2015). Applying a combined approach of FA, AHP and TOPSIS to select and rank appropriate maintenance and repair strategies. *Industrial Management Studies, 13*(39), 35-62. Retrieved from SID. https://sid.ir/paper/213184/fa

Sifonte, J., & Reyes-Picknell, J. (2017). *Reliability Centered Maintenance – Reengineered: Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R* (1st ed.). Productivity Press.

Supriyanto, H., Kurniati, N., & Supriyanto, M. F. (2021). Maintenance Performance Evaluation of an RCM Implementation: A Functional Oriented Case Study. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*.

Valmohammadi, C., Sofiabadi, J., & Lotfzadeh, F. (2017). Selecting a maintenance and repair strategy to improve reliability and repairability evaluation indicators. *Productivity Management, 3*(11), 175-196.

Yang, Y.-J., Zhang, X.-Y., Zhao, Z.-J., Wang, G.-H., He, Y.-J., Wu, Y.-L., & Li, J. (2020). Applying Reliability Centered Maintenance (RCM) to Sampling Subsystem in Continuous Emission Monitoring System. *IEEE Access, PP*, 1–1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980630

Yavuz, O., Doğan, E., Carus, E., & Görgülü, A. (2019). Reliability Centered Maintenance Practices in Food Industry. *Procedia Computer Science, 158*, 227–234. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.046

Yssaad, B., & Abene, A. (2016). Rational Reliability Centered Maintenance Optimization for power distribution systems. *Journal of Electrical Power & Energy Systems, 73*, 350-360.

Zadiran, K., & Shcherbakov, M. (2023). New Method of Degradation Process Identification for Reliability-Centered Maintenance of Energy Equipment. *Energies, 16*(2), 575. https://doi.org/10.3390/en16020575

Design and Implementation of Reliability-Centered Maintenance System using Key Performance Indicators (KPIs) and Risk Analysis (Case Study: Fiber Intermediate Products Company)

Amir Yousefi
Department of Industries, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran
Ommolbanin Yousefi (Corresponding Author)
Assistant Professor, Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan,Iran
E-mail: yousefi_1302@yahoo.com
Mehdi Karbasian
Professor, Department of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan, Iran

Abstract
The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) presents novel challenges that necessitate a modern approach, innovative thinking, and adherence to international standards for risk management, physical asset management, and fourth-generation maintenance and repair practices. Reliability-Centered Maintenance (RCM) stands out as a leading methodology that not only aligns with these international standards but also empowers users to comprehensively understand and quantify the risks associated with asset ownership and operation. This study aimed to design and implement a reliability and risk-based maintenance system within an upstream textile industry (Fiber Intermediate Product Co.) as a case study. Following a review of foundational research and the collection of equipment-related data, the most critical equipment was identified using key performance indicators and a multi-criteria decision-making technique. Subsequently, a Function Block Diagram (FBD) was developed, and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) worksheets were completed for the selected equipment. Risk analysis techniques were then applied, revealing 113 critical failures. Finally, appropriate maintenance strategies were determined for each failure using a decision-making diagram and an RCM worksheet. The resulting maintenance activities comprised 69% On-Condition Maintenance, 10% Scheduled Restoration, 7% Scheduled Discard, 7% Redesign, 5% Failure Finding, and 2% Run-to-Failure.

Keywords: Reliability-Centered Maintenance (RCM), Function Block Diagram (FBD), Risk Key Performance Indicators (KPIs), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).