مقاله‌ی پژوهشی

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی میزان خرابی
(مطالعه موردی: دستگاه مبدل حرارتی)

شهین دباغ
گروه تخصصی مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، ایران. Shahin.dabbagh@srbiau.ac.ir

یونس جاوید *
استادیار، گروه تخصصی مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. Javid@khu.ac.ir

فرزاد موحدی سبحانی
استادیار، گروه تخصصی مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، ایران. F-movahedi@srbiau.ac.ir

عباس سقایی
استاد، گروه تخصصی مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، ایران. a.saghaei@srbiau.ac.ir

کیا پارسا
استادیار، گروه تخصصی مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران. k_parsa@iau-tnb.ac.ir

چکیده: مطالعات قابلیت اطمینان بخش مهمی از هر برنامه‌ی مدیریت نگهداری تجهیزات است. با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها، استراتژی-های نگهداری برای دست‌یابی به تصمیمات پایدار برای مدیریت ضروری است. خرابی‌های ناگهانی در یک سیستم می‌تواند علت اصلی افت عملکرد ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی باشد. برای تصمیم‌گیری حیاتی درباره سیستم، از مکانیسم‌های مختلف تحمل خطا استفاده می‌شود. در مقاله حاضر، یک روش توزیع وایبل دو پارامتری به منظور تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های دستگاه مبدل حرارتی در صنایع پتروشیمی با استفاده از نرم افزار Isograph Hazop + v7.0 مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی‌که عملکرد موثر یک سیستم، به برنامه‌ریزی و قابلیت اطمینان آن در شرایط مناسب وابسته است، این مقاله به ارائه‌ی یک روش برای بدست آوردن قابلیت اطمینان برای محاسبه فواصل زمانی نگهداری پیشگیرانه در سیستم‌های واقعی پرداخته است. نتایج حاصل منجر به حجم کمتر بازرسی و فعالیت‌های تعمیراتی، ایمنی و قابلیت اطمینان واحدهای صنعتی و سود اقتصادی بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: بازرسی بر مبنای ریسک، قابلیت اطمینان، توزیع وایبل، ریسک، مبدل حرارتی

۱- مقدمه

مبحث نگهداری و تعمیرات تجهیزات از موضوعات پر اهمیت در صنایع مختلف می‌باشد که اجرای صحیح آن، سبب افزایش کارایی می‌شود. با توجه به بازار رقابتی شدید، شرکت‌ها تلاش زیادی جهت بهبود و بهینه‌سازی تولیدات خود، در جهت باقی ماندن در عرصه جهانی انجام می‌دهند [۱].

تجهیزات مهمترین عنصر یک سیستم تولید محسوب می شوند و وضعیت آن ها بهره‌وری، کیفیت و هزینه را تحت تأثیر قرار می دهد. در حال حاضر، اغلب شرکت‌های تولیدی دارای ضریب کارآیی تجهیزات پایینی هستند. بنابراین بهبود کارآیی تجهیزات، یک اقدام موثر در جهت بهبود بهره‌وری شرکت، کاهش هزینه‌های ساخت، بهبود کیفیت محصولات و در نهایت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰
دوره ۱۱/ شماره ۱
صفحات ۶۱-۷۶

*(Corresponding author): Javid@khu.ac.ir

ارتقا و توسعه پایدار شرکت است [۲]. روش‌های مختلفی برای نگهداری و تعمیرات پیشنهاد شده است که رکن اساسی آن‌ها بر ریسک‌های احتمالی، استوار می‌باشد [۳]. ریسک رویدادی غیر قطعی اســـت که اثری مثبت یا منفی بر اهداف عملکردی پروژه دارد، این اثر می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

اگر ریسک در راستای بهبود اهداف عملکردی پروژه باشد، ریسک مثبت یا فرصت و اگر در جهت تضعیف اهداف عملکردی پروژه باشد، ریسک منفی یا تهدید نامیده می‌شود. در مفهوم ریسک، مجموعه اقدامات پیشگیرانه مدنظر است[۴]. از نظر نمادین، می‌توان بیان کرد که خطر[۱] = عدم اطمینان[۲] + آسیب[۳] [۵]. محاسبه خطر به معنی محاسبات مبتنی بر مدل‌ها و پارامترهای مشخص شده که با عدم اطمینان همراه است [۶]. به‌طورکلی، ریسک را رویکردهای "مبتنی بر خطر" تعریف می‌کنند، یعنی، به عنوان ترکیبی از پیامدهای ناشی از دامنه حوادث احتمالی و احتمال بروز این حوادث [۷]. به عبارت دیگر، احتمال به‌وجود آمدن آسیب از یک خطر معین، ریسک نامیده می‌شود و به فرایند کلی برآورد کردن میزان ریسک و تصمیم‌گیری در خصوص قابل تحمل بودن ریسک، ارزیابی ریسک گفته می‌شود [۸].

امروزه ریسک و مباحث مربوط به آن همچون تخصیص ریسک، شناسایی ریسک و مدیریت ریسک جایگاه ویژه‌ای در مباحث علمی و صنعتی پیدا نموده است. ویژگی‌هایی چون شرایط خاص هر پروژه، اهداف و الزامات پروژه، همچنین عدم قطعیت موجود در بخش‌های طراحی، تأمین و تدارک تجهیزات اصلی پروژه منشاء بروز ریسک در پروژه قلمداد می‌شوند، بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی استراتژیک مدیریتی جهت بررسی عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های پروژه اجتناب ناپذیر است[۹].

مدیریت‌ریسک یک روش منطقی برای تحلیل و ارزیابی ریسک است که مدیران را قادر می‌سازد تا ضمن بهره‌گیری از فرصت‌ها، خسارت‌ها را به حداقل برسانند. در واقع مدیریت‌ریسک را بر مبنای دو عنصر اولیه ریسک به مفهوم شدت آسیبی که در اثر یک شرایط خطرناک به‌وجود می‌آید و احتمال وقوع خطر، بنا نهاده است که احتمال وقوع خطر براساس میزان تماس با خطر، تعداد افرادی که باخطر مواجهند فاکتورهای محیطی و قابلیت اعتماد عملکرد ایمنی تعیین می‌شود [۱۰].

در طول ۱۰ تا ۱۵ سال گذشته، رویکردهای مبتنی بر قابلیت اطمینان و رویکردهای مبتنی بر ریسک جهت برنامه‌ریزی بازرسی‌ها توسعه یافته‌اند. این رویکردها در حال حاضر به روش‌های کاربردی قابل اجرا در آمده‌اند و در صنایع مختلف استفاده می‌شوند[۱۱].

قابلیت اطمینان بر پایه وقوع خرابی‌ها تعریف می‌شود. در واقع قابلیت اطمینان یک وسیله، عبارت است از میزان موفقیت آن‌وسیله در اجرای وظایف خود. هر چه میزان قابلیت اطمینان در یک سیستم بیشتر باشد، احتمال اجرای فرمان در آن سیستم و زیرمجموعه‌های آن بیشتر است. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، فرایندی است که نیازهای نگهداری و تعمیرات تجهیزات و ماشین‌آلات را در شرایط کاری تعیین می‌کند تا هر یک از این تجهیزات به بهترین نحو وظایف اصلی خود را انجام دهند [۱۲].

کشورهای دارای تجهیزات و سرمایه در صنعت نفت و گاز توجه زیادی به بحث بازرسی در این صنعت دارند، زیرا که هزینه مربوط به تجهیزات این صنعت بسیار زیاد است و جلوگیری از عدم خرابی آن‌ها نقشی مهم در سودآوری در پروژه‌های نفت و گاز دارد. انجام دوره‌ای بازرسی‌های فنی منجر به کاهش خرابی و افزایش طول عمر تجهیزات و سیستم‌های موجود در صنعت نفت و گاز می‌شود. این بازرسی‌ها در سطوح مختلف و با استفاده از روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد [۱۳].

در دهه۱۹۹۰، روش‌های بازرسی مبتنی بر ریسک در روش‌های نگهداری و تعمیرات شروع به ظهور کردند و در اواخر سال۲۰۰۰ عمومیت یافتند. در این دهه به بازرسی مبتنی بر ریسک، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان[۴] و تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط[۵] به شدت تاکید شده‌است. تا قبل از سال ۲۰۰۰، نگهداری تجهیزات و ایمنی دو فرایند و فعالیت جداگانه و مستقل از یکدیگر محسوب می‌شدند. تکنیک‌های مدیریت تعمیر و نگهداری در طول سال‌های اخیر از طریق یک فرایند عمده دچار دگرگونی بوده است. امروزه پیشرفت تعمیر و نگهداری به‌واسطه افزایش

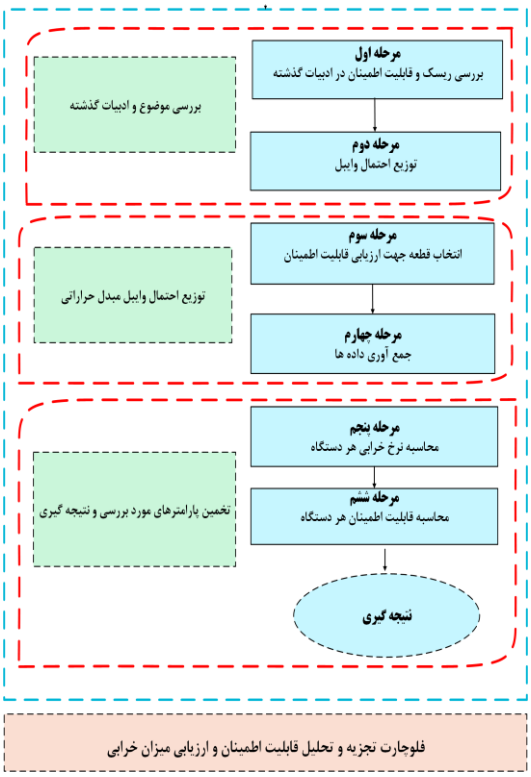
[۱] Risk
[۲] Uncertainty
[۳] Damage

[4] Reliability Centered Maintenance (RCM)
[۵] Condition Based Maintenance (CBM)

پیچیدگی فرایندهای تولید و انواع محصولات، افزایش آگاهی از تأثیر نگهداری بر محیط زیست و ایمنی پرسنل، سودآوری کسب و کار و کیفیت محصولات بوجود آمده‌است [۱۴]. امروزه مطالعات قابلیت اطمینان بخش مهمی از هر برنامه مدیریت نگهداری تجهیزات شده است و به منظور انجام تجزیه و تحلیل تعمیر و نگهداری موثر بر مبنای قابلیت‌اطمینان، داده‌های دقیق و کامل ضروری است [۱۵]. تحلیل ریسک یک تکنیک برای تعیین، توصیف و کمی‌سازی اثرات ناشی از یک خطر است. تکنیک‌های تحلیل و ارزیابی ریسک[۶] به سه دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: کیفی، کمی و تکنیک‌های ترکیبی [۱۶]. برنامه‌ریزی بازرسی مبتنی بر ریسک[۷] ابزاری جهت تعیین تأثیر بازرسی‌ها بر روی شناسایی خطر و در نتیجه شناخت استراتژی‌های بهینه بازرسی است. برنامه‌های مبتنی بر ریسک و قابلیت‌اطمینان برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری، می‌توانند به طور مثبت بر هزینه نگهداری تأثیر بگذارند[۱۷] و [۱۸]. تعمیر و نگهداری مبتنی بر ریسک ابزاری برای برنامه‌ریزی تصمیم‌گیری برای کاهش احتمال خرابی تجهیزات و عواقب خرابی را فراهم می‌کند [۱۹].

آنچه مسلم است با گذشت زمان و افزایش عمر قطعات در کارخانه‌ها، الزامات تعمیرات و نگهداری اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. بنابراین، به منظور بهبود ایمنی و دست‌یابی به تنظیمات بهینه هم از نظر سرمایه‌گذاری و هم از جهت تعمیر و نگهداری و به صورت کلی، به منظور افزایش قابلیت اطمینان، یک برنامه بازرسی مورد نیاز است. این پژوهش یک چارچوب اصلی چند منظوره بازرسی بر مبنای ریسک را پیشنهاد می‌کند که از جمله اهداف آن می‌توان به افزایش قابلیت‌اطمینان اشاره کرد. خرابی‌های ماشین‌آلات و دستگاه‌ها و در پی آن خاموش شدن‌های ناخواسته توقف خط تولید را به‌همراه خواهد داشت. بنابراین، توجه به قابلیت‌اطمینان این تجهیزات صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، یک توزیع دو پارامتری وایبل در نظر گرفته شده است که قابلیت اطمینان اجزای دستگاه مبدل حرارتی را تخمین می‌زند. روش پیشنهاد شده در این تحقیق، راه‌حل مناسبی برای کاهش تلفات در دستگاه‌های مبدل‌حرارتی است و دست‌یابی به این هدف از طریق نگهداری و تعمیرات بهینه فراهم می‌آید. مسیر تحقیق در شکل (۱) بیان شده است.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ به مرور ادبیات در زمینه بازرسی بر مبنای ریسک پرداخته شده است، در بخش ۳ مدل‌سازی ریاضی و در بخش ۴ تخمین تابع چگالی احتمال و نرخ شکست بیان شده است و در بخش ۵ به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.



شکل (۱): مسیر تحقیق

۲- مرور ادبیات

در سال ۲۰۰۱ دی[۸] به ارائه مدل مبتنی بر ریسک برای بازرسی و نگهداری خطوط لوله‌های نفتی بین کشور پرداخته است. این مدل میزان زمان صرف شده برای بازرسی را کاهش می‌دهد [۲۰]. در سال ۲۰۰۹، گائو[۹] و همکاران مقاله‌ای با عنوان ارزیابی انتقادی تجهیزات پتروشیمی بر اساس ارزیابی

[۶] Risk Analysis and Assessment
[۷] Risk Based Inspection (RBI)
[۸] P.K. Dey
[۹] Guo

جامع فازی و یک شبکه عصبی BP[۱۰] ارائه دادند. در این پژوهش بیان شده که تحلیل حساسیت تجهیزات، به خصوص در یک کارخانه جدید پتروشیمی، پایگاه مهمی برای تصمیم‌گیری در زمینه تعمیر و نگهداری جهت جلوگیری از حوادث و بهینه‌سازی مدیریت نگهداری در تعمیر و نگهداری متمرکز قابلیت‌اطمینان[۱۱]است [۲۱]. رودولفو تلز[۱۲] و همکاران در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای با عنوان "فرایند اصلاحات شبکه مبدل‌های‌حرارتی[۱۳] با استفاده از تئوری قابلیت‌اطمینان" ارائه دادند. در این مطالعه بیان شده است که برای یک شبکه مبدل‌حرارتی معین اغلب لازم است که رفتار آن، در دمای تامین و یا تغییر در نرخ جریان ورودی مشخص شود و در این حالت مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. کارایی و صحت استفاده از تئوری قابلیت‌اطمینان همراه با عدم قطعیت‌های طراحی فازی در این حالت، که برای تعیین احتمال نقض محدودیت‌های شبکه مبدل‌حرارتی مورد استفاده قرار گرفته، در این مقاله به اثبات رسیده است [۲۲]. گالنگ سندی پرایوگو[۱۴] و همکاران در سال ۲۰۱۶ مقاله‌ای با عنوان تجزیه و تحلیل ریسک ژنراتور بخار احیا کننده با بازرسی نیمه کمی مبتنی بر ریسک (API580) ارائه دادند [۲۳]. خوردگی یک مشکل عمده است که اغلب در نیروگاه‌ها رخ می‌دهد و تأثیر آسیب خوردگی باعث ایجاد توقف نیروگاه ژنراتور بخار احیا کننده می‌شود. تعیین نرخ خرابی[۱۵]، یکی از شاخص‌های کلیدی در تعمیرات و نگهداری تجهیزآلات می‌باشد که عبارت است با نسبت تعداد خرابی اتفاق افتاده در سیکل زمان بر زمان کل سیستم [۲۴]. اسدزاده[۱۶] در تحقیقی نرخ خرابی تجهیزات را پیش‌بینی و مدل‌سازی کرد. وی از پیش‌پردازش داده‌های به دست آمده مدلی برای برآورد نرخ شکست با استفاده از MATLAB ارائه نمود. نتایج این مدل‌سازی با مدل‌سازی به‌وسیله روش شبکه عصبی پرسپترون چند لایه مقایسه شد که نتایج نشان دهنده دقت بیشتر مدل ارائه شده می‌باشد [۲۵]. خان[۱۷] و همکاران در سال ۲۰۰۴ به تحقیق در مورد نگهداری و تعمیرات تجهیزات مورد استفاده در صنعت نفت، بر مبنای ریسک و بر اساس منطق فازی پرداختند. آن‌ها با استفاده از منطق فازی، مدلی برای تصمیم‌گیری چندگانه جهت نگهداری و تعمیرات بر پایه ریسک ارائه دادند [۲۶]. جاوید[۱۸] در سال ۲۰۲۱ یک مدل ریاضی دو هدفه برای تعیین برنامه‌های بازرسی مبتنی بر ریسک ارائه داد. هدف این مدل کاهش هزینه‌های کل و همچنین خطرات ناشی از برنامه‌های بازرسی مبتنی بر ریسک می‌باشد. نتایج این مدل توسط دو الگوریتم فراابتکاری مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷].

از آنجا که بحث نگهداری و تعمیرات مناسب یک عنصر حیاتی است، سازمان‌ها برای سنجش اثربخشی فعلی و پیش‌بینی عملکرد و کارایی آتی معیارهایی در این خصوص در نظر می‌گیرند. تعریف این‌گونه از معیارها بسیار مهم است و می‌تواند نمایانگر این مساله باشد که چگونه خرابی (شکست)های غیرمنتظره می‌توانند بر اهداف سازمان و مراحل تولید اثر بگذارند. یکی از این معیارها، میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر یک خرابی[۱۹] است در سیستم است. روش‌های مختلفی برای محاسبه این معیار وجود دارد که هر کدام از آن‌ها با محدودیت‌هایی مواجه هستند. یکی از روش‌های تعیین میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر یک خرابی توسط علویان و همکاران ارائه شد که این روش علاوه بر نداشتن محدودیت‌های روش‌های قبلی، دارای دقت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد [۲۸]. شاخص مهم دیگر در این حوزه، میانگین زمان‌خرابی[۲۰] است که بسیار پراهمیت می‌باشد. این شاخص برابر است با میانگین زمان خرابی و در واقع بیان‌کننده‌ی مدت‌زمانی است که انتظار می‌رود یک سیستم در حال‌کار دوباره خراب شود [۲۹]. مرتضوی و همکاران روشی برای تعیین میانگین زمان‌خرابی با توجه به قابلیت اطمینان ارائه کردند. آنان با توجه به اینکه تعیین خرابی‌ها و قابلیت‌اطمینان مربوط به آن‌ها فرآیند غیرقطعی است، از روش فازی برای این منظور استفاده کردند که نتایج حاصل از این مدل نشان دهنده دقت این روش بود [۳۰].

در محاسبه ریسک همواره می‌بایست عدم‌اطمینان برای

[۱۰] Back-propagation
[۱۱] Reliability Centered Maintenance (RCM)
[۱۲] Rodolfo Tellez
[۱۳] Heat exchanger network
[۱۴] Galang Sandy Prayogo
[۱۵] Failure Rate
[۱۶] Asadzadeh, Sh
[۱۷] Khan
[۱۸] Javid, Y
[۱۹] Mean Time to Repair
[۲۰] Mean Time Between Failures

پارامترهای دیگر را نیز لحاظ کرد [۳۱]. به‌طور کلی، ریسک را رویکردهای "مبتنی بر خطر" تعریف می‌کنند، خطر به عنوان ترکیبی از پیامدهای ناشی از دامنه حوادث احتمالی و احتمال بروز این حوادث تعریف می‌شود [۳۲]. بخش مهمی از برنامه‌های مدیریت و نگهداری تجهیزات، مربوط به مطالعات قابلیت اطمینان آن‌ها است. تخمین قابلیت اطمینان یک ابزار مفید برای مدیریت در شرایط عملیاتی همراه با عدم قطعیت‌ها است [۳۳].

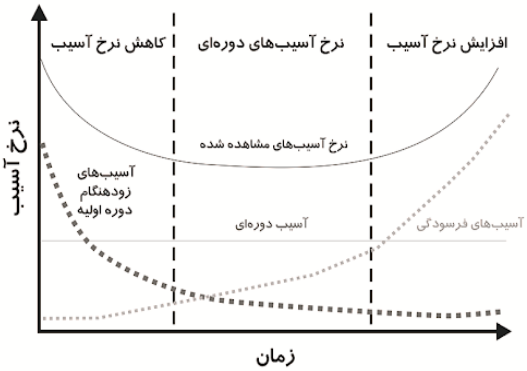
با توجه به ماهیت پیچیده تعیین بازرسی و پارامترهای مربوط به آن، به دلیل وجود تعداد زیادی عامل موثر در این رابطه، روش‌های متنوعی برای حل آن پیشنهاد شده است. یکی از روش‌ها، استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین می‌باشد که توسط راچمن و راتناياک [۲۱] استفاده شد. آنان در این تحقیق از داده‌های یک مورد مطالعه‌ای استفاده کردند و مقایسه نتایج به دست آمده از این روش حاکی از صحت و دقت این روش می‌باشد [۳۴]. از دیگر روش‌های ارائه شده می‌توان به استفاده از شبکه‌های بیزی اشاره کرد که لوکو و استراب[۲۲] روشی بهینه برای بازرسی مبتنی بر ریسک ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از روش شبکه‌های بیزی و الگوریتم مونت کارلو این مدل را ارائه کردند که قابل اعمال بر سیستم‌های صنعتی است [۳۵].

هدف ما در این مقاله بررسی برخی از مدل‌های عملی برای بررسی میزان خرابی است، زیرا یکی از بزرگترین مسائل پیش رو در صنعت تولید، خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی می‌باشد که باعث تأثیر نامطلوب بر جریان و روند تولید و عملیات اصلی کسب‌وکار می‌شود. توزیع رایج که امروزه توسط مهندسین برای بررسی قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد، توزیع وایبل است. همچنین نگهداری متمرکز بر قابلیت‌اطمینان بازه‌های زمانی نگهداری را بر اساس اهمیت و تاریخچه عملکرد یک قطعه تعیین می‌کنند. در این مقاله با استفاده از توزیع وایبل دو پارامتری و محاسبات با استفاده از نرم افزار Isograph Hazop + v7.0 قابلیت اطمینان سیستم برآورد می‌شود.

۳- مدل سازی ریاضی

۳-۱- توزیع وایبل

توزیع وایبل [۲۳] یکی از توزیع‌های احتمالاتی پیوسته است که به نام والدی وایبل نامگذاری شده است. این توزیع بسیار انعطاف‌پذیر است و می‌تواند از طریق انتخاب مناسب پارامترها، بسیاری از رفتارهای نرخ شکست را مدل سازی کند. این توزیع را می‌توان با دو یا سه پارامتر تخمین زد، پارامتر مقیاس، شکل و مکان. چندین روش برای تخمین مقادیر این پارامترها وجود دارد که برخی از آن‌ها گرافیکی و برخی دیگر تحلیلی هستند. روش‌های گرافیکی خیلی دقیق نیستند، اما نسبتا سریع هستند، اما روش‌های تحلیلی در مقایسه با روش گرافیکی دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر به حساب می‌آیند. در مطالعات پیشین نشان داده شده است که توزیع‌های وایبل در مدل‌سازی انواع توزیع‌های مختلف طول‌عمر، بسیار انعطاف‌پذیر است و از آن‌ها برای مدل‌سازی هر یک از سه بخش در یک منحنی وانی شکل استفاده شده است [۳۶]. نرخ خرابی، یک تابع زمانی است، به گونه‌ای که تابع نرخ خرابی در مقایسه با زمان را می‌توان به صورت شکل(۲) نشان داد:



شکل (۲): منحنی وانی شکل [۳۷]

منحنی وانی شکل در مبحث قابلیت اطمینان اهمیت قابل توجهی دارد. این منحنی بیان‌گر سه مرحله مجزا است. در فاصله زمانی مرحله اول نرخ شکست سیر نزولی داشته و نسبت به زمان کاهش می‌یابد که به شکست زودرس معروف است. در مرحله دوم نرخ شکست تغییری نمی‌کند، بلکه ثابت می‌ماند که به نرخ شکست ثابت معروف است و مرحله

[۲۱] Rachman and Chandima Ratnayake
[۲۲] Luque and Straub
[۲۳] Weibull Distribution

سوم یا دوره فرسودگی، نرخ شکست نسبت به زمان افزایش می یا بد. در این دوره، تابع های احتمال نر مال و وایبل می‌توانند بیانگر زمان‌های شکست سیستم باشند. از آنجایی‌که سیستم با گذشت زمان فرسایش بیشتری یافته و سرعت شکست آن افزایش یافته و مرتبا نرخ شکست افزایش می‌یابد، لذا در این دوران است که سیاست‌های تعویض سیستم اعمال می‌شود [۳۷].

توزیع وایبل سه پارامتری از رابطه‌ی (۱) پیروی می‌کند:

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \qquad (۱)$$

$$\beta > 0 . \quad \eta > 0\ t \geq \gamma \geq 0$$

تابع توزیع تجمعی وایبل برابر مطابق با رابطه شماره (۲) برابر است با:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \qquad (۲)$$

η پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل و γ پارامتر مکان و t جهت زمان نام‌گذاری می‌شوند. برای بدست آوردن تابع توزیع تجمعی وایبل دو پارامتری $\gamma = 0$ می‌باشد [۳۱] و[۳۸].

عملکرد میزان شکست با استفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

$$r(t) = \left(\beta/\eta\right)\left(t/\eta\right)^{\beta-1} \qquad (۳)$$

مشاهده می‌شود که وقتی $\beta < 1$ باشد، میزان خرابی در حال کاهش است و زمانی که $\beta > 1$ میزان خرابی در حال افزایش است و $\beta = 1$ ، یک توزیع نمایی شناخته شده است که دارای میزان شکست ثابت است [۳۰]. برای متغیرتصادفی تابع توزیع تجمعی وایبل به صورت رابطه‌ی (۴) نوشته می‌شود.

$$Q(t) = F(t) = 1 - exp\{-\left(t/\eta\right)^{\beta}\} \quad t \gg 0 \qquad (۴)$$

از طریق فرایند خطی سازی رابطه‌ی (۴) را می‌توان محاسبه کرد و شکل رابطه‌ی (۵) به صورت خطی نوشته شود:

$$Y = mx + c$$

$$Q(t) = 1 - \exp\{-\left(t/\eta\right)^{\beta}$$

$$\ln(1 - Q(t) = \ln(\exp\{-\left(t/\eta\right)^{\beta})$$

$$\ln(1 - Q(t) = -\left(t/\eta\right)^{\beta})$$

$$\ln(-\ln(1 - Q(t)) = \beta\, ln\left(t/\eta\right)$$

$$\ln\left(-\ln\left(1/1 - Q(t)\right)\right) = \beta\, ln\,(t) - \beta\ln(\eta)$$

$$y = \ln(\ln(1/1 - Q(t)))$$

$$x = ln\,(t)$$

$$y = \beta(x) - \beta\ln(\eta) \qquad (۵)$$

تابع میزان‌خرابی وایبل به عنوان تعداد خرابی‌ها در هر واحد زمان تعریف شده است، که بصورت تابع توزیع تجمعی[۲۴] در رابطه (۶) تعریف می‌شود [۲۹]:

$$R(t) = exp\{-\left(t/\eta\right)^{\beta}\} \qquad (۶)$$

۳-۲- بیان مسئله

امروزه خوردگی[۲۵] تجهیزات صنعتی یکی از اساسی‌ترین مشکلات صنعت مخصوصا صنایع پتروشیمی است که سالانه مشکلات بسیاری از جمله از دست رفتن مواد، خاموش شدن‌های ناخواسته، صرف هزینه‌ها و از دست رفتن مواد و علاوه برآن‌ها، مشکلات زیست‌محیطی را نیز به دنبال دارد. خوردگی در تجهیزات صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و سیستم‌های حفاری چاه‌های نفت و گاز یک عامل جدی خطر است. خوردگی نه تنها موجب زیان‌های اقتصادی می‌شود، بلکه ممکن است با مشکلات ایمنی و حفاظت از منابع همراه باشد. سرعت و رفتار خوردگی هر فلز یا آلیاژ با توجه به شرایط محیط، با دیگری متفاوت می‌باشد. انتخاب هر ماده با توجه به خواص و مشخصات مربوط به آن و عملکرد آن در برابر عوامل محیطی صورت می‌پذیرد.

تبادل گرمایی یکی از مهم‌ترین فرآیندها در صنایع شیمیایی می‌باشد که دارای کاربرد فراوان می‌باشد. یکی از انواع متداول این فرآیند در صنعت، انتقال حرارات در طراحی تجهیزات انتقال حرارات برای تبادل گرما بین سیالات می‌باشد. چنین

[۲۴] Cumulative distribution function

[۲۵] Corrosion

وسایلی برای انتقال کارآمد گرما معمولا مبدل‌های حرارتی [۲۶] نامیده می‌شوند. انواع مختلفی از مبدل‌های حرارتی وجود دارند که اساس عملکرد همه آن‌ها یکسان است، اما ساختار و روش عملکردی آن‌ها متفاوت است.

مبدل‌های‌حرارتی صفحه‌ای و پوسته-لوله بیشترین کاربرد را در صنعت دارند، بنابراین رایج‌ترین تجهیزات تبادل گرما هستند. از جمله مزایای این نوع مبدل می‌توان به طراحی مکانیکی مناسب، قابلیت بازرسی پوسته و لوله برای انواع مختلفی از مواد جهت جلوگیری از انواع خوردگی، حداکثر سطح انتقال حرارت بر اساس مشخصات پوسته و قطر لوله و همچنین هزینه پایین‌تر نسبت به مدل‌های دیگر اشاره کرد و از جمله معایب آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: به دلیل وجود لوله‌های Uشکل دسترسی به سطوح داخلی آن بسیار مشکل است و فقط با استفاده از روش‌های شیمیایی قابل تمیز کردن هستند، تعویض لوله‌ها به صورت جداگانه با مشکلات بسیاری همراه است، همچنین ضخامت دیواره لوله در قسمت خم U کمتر است و احتمال آسیب (خوردگی، ترک، شکستگی و...) بسیار زیاد است [۳۹]. برآورد قابلیت اطمینان ابزاری مفید برای بهبود طراحی دستگاه مبدل‌حرارتی است که در شرایط عملیاتی با عدم قطعیت مواجه است[۴۰].

مرحله شناسایی ریسک بسیار ضروری است، زیرا پایه‌های تحلیل بر مبنای ریسک‌ها تعیین می‌شود. در واقع، داده‌های شناسایی ریسک، ورودی مراحل ارزیابی خواهد بود. بنابراین، برای دستیابی به بهترین نتیجه، لازم است که شناسایی داده‌ها در یک مرحله و به صورت جامع انجام شود [۴۰].

مطالعه موردی حاضر در یکی از شرکت‌های پتروشیمی ایران مورد بررسی و اطلاعات مورد نیاز از دستگاه‌های مبدل حرارتی برگرفته شده است. شکل (۳) یک دستگاه مبدل حرارتی را نشان می‌دهد.

شکل (۳): دستگاه مبدل حرارتی

دستگاه‌های مبدل حرارتی در معرض فرایندهای آسیب مانند رشد ترک، خوردگی، نشتی و ... قرار دارند. انواع مدل‌هایی که ریسک این فرایندها را توصیف می‌کنند، با عدم قطعیت همراه هستند که از طریق بازرسی‌ها می‌توان آن‌ها را کاهش داد. با ارائه اطلاعاتی در مورد وضعیت واقعی سازه، بازرسی‌ها کاربرد هدفمند اقدامات تعمیر را تسهیل می‌کنند. با انجام این کار، بازرسی‌ها اقدامات موثر برای کاهش ریسک هستند. خوردگی در اجسام و مواد به کار رفته در صنایع گوناگون همچون صنایع هوایی، کشتی‌سازی، نفت، گاز و پتروشیمی بسیار حائز اهمیت بوده و اگر به موقع مورد توجه قرار نگیرد، می‌تواند باعث ایجاد خسارات و خطرات جبران ناپذیری از نظر تجهیزات، میزان هدررفت انرژی و همچنین آسیب‌های زیست محیطی شود. با استفاده از روش بازرسی مبتنی بر ریسک می‌توان خطرات را به خوبی شناسایی کرد، آن‌ها را در اولویت قرار داد و سپس اولویت را به بحرانی‌ترین منطقه اختصاص داد[۴۱].

نگهداری متمرکز بر قابلیت‌اطمینان بازه‌های زمانی نگهداری را بر اساس اهمیت و تاریخچه یک قطعه تعیین می‌کند [۴۱]. در این پژوهش از استاندارد API 581 برای شناسایی ریسک استفاده شده است. شایان ذکر است که چند مکانیزم مختف خرابی وجود دارد که مبدل‌حرارتی می‌تواند آن‌ها را تجربه کند مانند خوردگی، سوراخ شدن، ترک، فرسایش، آسیب ارتعاشی، خرابی مکانیکی و نازک شدن لوله [۴۱].

بسیاری از ریسک‌ها ناشی از رسوب‌گذاری است. رسوب‌گرفتگی منجر به پایین آمدن بازدهی حرارتی و بالارفتن افت فشار می شود که ممکن است به خوردگی نیز بیانجامد و باعث از کارافتادگی مبدل‌های حرارتی شود؛ پارامترهای مختلفی بر توسعه رسوب تأثیر می‌گذارند، از این جمله می‌توان سرعت جریان، دمای سطح، هندسه سطح و خصوصیات سیال را نام برد [۴۲].

بازرسی بر مبنای ریسک یک روش نوین در مدیریت بازرسی بوده و از ارزیابی ریسک به منظور برنامه‌ریزی، توجیه و تفسیر نتایج حاصل از بازرسی، آزمایش و پایش استفاده می‌نماید. در این روش برخلاف روش‌های سنتی بازرسی، فاصله بازرسی ثابتی تعریف نمی‌شود، بلکه برای هر دستگاه، فاصله زمانی و روش بازرسی مشخصی تعیین می شود. با

[۲۶] Heat Exchanger

اســتفاده از این روش ضــمن اجتناب از بازرســی‌های مکرر، می‌توان امکانات و توانمندی های بازرســی را بر روی دســتگاه‌هایی با ریســک بالاتر متمرکز و ریســک را مدیریت کرد. به‌طور واضح، بازرسی نمی‌تواند مکانیزم‌های تخریب را متوقف کند، بلکه بازرسی مکانیزم‌های تخریب را شناسایی، پایش و اندازه‌گیری می‌کند [۳۶].

در این پژوهش با توجه به گســترده بودن مواد و شــرایط محیطی در صنعت نفت، تجهیزات با اولویت صنعت نفت که در شــرایط حادتری از منظر خوردگی قرار دارند، دســتگاه مبدل حرارتی جهت بررســی مدنظر قرار گرفته اســت. به همین دلیل هدف تحقیق ارتقای روش بازرســی بر مبنای ریسک و کمک به مهندسان جهت ارائه‌ی برنامه‌های بازرسی کارآمدتری در صــنعت پتروشــیمی کشــور می‌باشــد. در این راستا، یک چارچوب اصلی بازرسی بر مبنای ریسک پیشنهاد می‌شــود که از جمله اهداف آن می‌توان به کاهش ریســک و افزایش قابلیت اطمینان اشاره کرد.

۳-۳- مطالعه موردی(دستگاه مبدل حرارتی)

در ابتدا به بررسی ساختار دستگاه مبدل‌حرارتی پرداخته می‌شود که شامل زیر اجزای پوسته، سر، سینی‌ها، دریچه‌ها، حلقه پشتیبانی، فیلترها، توزیع کننده‌ها، حفره‌های ضربه‌ای و نقاط متصل به زمین است که در جدول شماره ۱ به آن‌ها اشاره شده است. در این جدول بیان شده است که زیرسیستم‌های دستگاه مبدل‌حراراتی از چه قطعاتی تشکیل شده‌اند و نوع خرابی آن‌ها بر طبق استاندارد API581 از چه نوعی می‌باشد. براساس تعریف RBI، خرابی که در مبدل حرارتی رخ داده است ممکن است به علت برخی مکانیسم‌های آسیب مانند خوردگی عمومی، فرسایش، لرزش و غیره به عنوان نشت لوله تعریف شود [۴۲]. همچنین جهت سهولت انجام کار برای هر قطعه از کد استفاده شده‌است. به‌عنوان مثال برای پوسته[۲۷] از عبارت انگلیسی آن کمک گرفته و به صورت SH در جدول (۱) نشان داده شده است و به همین ترتیب برای بقیه اسامی قطعات، کدها به همین صورت برگرفته از عبارت انگلیسی آن‌ها تعریف شده است.

جدول (۱) :طبقه‌بندی زیرسیستم‌های مبدل حرارتی

کد گذاری	اجزا مبدل حرارتی	اجزا مبدل حرارتی
SH	بدنه (داخلی وخارجی)	Shell
H	سر	Head
T	سینی‌ها	Trays
V	شیرها و پیچ سینی‌ها	Valves &Bolting Tray
SR	حلقه نگهدارنده	Support Ring
F	فیلتر	Filter
D	پخش کننده‌ها	Distributers
B	صفحه‌های محافظ	Impingement Baffles
E	سیستم اتصال زمین	Earthing

۴-۳- روش حل

این تحقیق از نظر روش، بنیادی -کاربردی می باشد. پس از تعیین چار چوب کلی مساله تحقیق و مطالعه پیشینه تحقیق و مشخص شدن جایگاه تحقیق در میان مطالعه انجام شده به تعریف مساله پرداخته شده‌است. لذا این مطالعه، به شناسایی مخاطرات در تجهیزات پالایش و پتروشیمی متمرکز شده است. مفاهیم وتعاریفی که ما در این ارتباط ارائه خواهیم کرد، قابل استفاده در کاربردهای عملی برای طیف گسترده‌ای از موقعیت‌های خطر در شرکت‌های پتروشیمی می‌باشد. نخستین گام در آنالیز فرایند قابلیت اطمینان، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز است. داده‌های ارائه شده در این پژوهش مربوط به هفت دستگاه مبدل‌حرارتی می‌باشد. این داده‌ها طی یک سال از مهر ۹۷ تا مهر ۹۸ با استفاده از گزارش‌های بازرسی دوره‌ای تهیه و جمع‌آوری شده است و همان‌طور که در جدول (۱) بیان شده است، جهت سهولت انجام کار، برای هر قطعه از کد استفاده شده است. داده‌های بدست آمده در جدول (۲) نشان داده شده است.

[۲۷] Shell

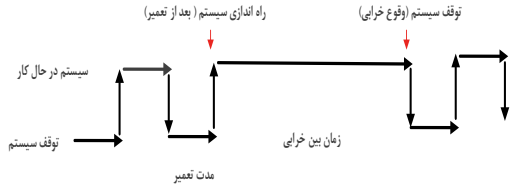
جدول (۲): اطلاعات خرابی و تعمیر زیر سیستم‌های مبدل‌حرارتی

Equipment ID		*SH*	*H*	*N*	*T*	*V*	*SR*	*F*	*D*	*IB*	*E*
	FF(%)	۲۷	۱۶	۵	۲۰	٤	۳۲	٤۵	٤	۷	۲
HE-TUBE -1	TBF(h)	۵۷۶	۳۸۸	۳٤۱	۲۱۱	۵۷۰	۵٤۶	۸۸۳	٤۵۰	۳۲۰	۱۲۱
	TTR(h)	۲۹۹	۱٤۳	۲۰۰	۱۲۱	۱۳۳	۳۲۰	٤۳۲	۲۱۱	۱٤۰	۱۰۰
	FF(%)	۲۳	۶	٤	۸	۶	۲۰	۲۲	۵	۳	۱
HE- TUBE -2	TBF(h)	٤۳۵	۲۳٤	۳۶۹	۱۹۸	٤۸۰	۵۸۰	۷۶۰	۳۹۰	۳۱۰	۱۹۹
	TTR(h)	۳۲۰	۱۲۳	۱۲۳	۱۱۲	۱٤٤	۳٤۰	٤۳۰	۱۹۹	۱۲۰	۹۸
	FF(%)	۱۹	۵	۳	۶	۸	۱۶	۱۹	۳	۸	۰
HE- TUBE -3	TBF(h)	٤۵۰	۱۸۰	۳۲۰	۲۲۰	۱۶۰	٤۰۰	٤۸۰	۳۵۰	۲۳۰	۰
	TTR(h)	۳۱۰	۱۱۳	۱۶۰	۱۰۰	۱۲۰	۳۲۰	٤۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۰
	FF(%)	۱۶	۶	۵	۶	۹	۱۸	۱۵	۲	۷	۱
HE- TUBE -4	TBF(h)	۳	۲۶۰	۳۶۰	۲۷۰	۱۸۰	٤۱۰	۳۸۰	۳۱۰	۱۹۰	۱٤۰
	TTR(h)	۲۹۹	۱۳۳	۲٤۰	۱٤۰	۱۵۰	۳۰۰	۳۹۰	۱۹۰	۱٤۰	۹۰
	FF(%)	۲۵	۱٤	٤	۱۷	۳	۲۹	۳۸	۳	۶	۱
HE- TUBE -5	TBF(h)	۵۶۶	۳۷۰	۳۲۰	۱۹۹	۵٤۰	۵۳۰	۷۶۵	٤۰۰	۲۹۸	۱۰۰
	TTR(h)	۲۵۰	۱۳۳	۱۹۹	۱۳۰	۱۲۰	۲۸۰	٤۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۱۰۰
	FF(%)	۲۸	۵	۶	۵	۶	۱۳	۱۷	۳۲	۷	۰
HE- TUBE -6	TBF(h)	٤۸۰	۱۷۰	۳۸۰	۲۰۰	۱٤۰	۳۰۰	۳۸۰	۳۰۰	۲۱۰	۰
	TTR(h)	۳۹۰	۱۵۳	۱۹۰	۱۳۰	۱۲۰	۲۹۰	۳۲۰	۲۰۰	۱۳۰	۰
	FF(%)	۳۵	۸	٤	۷	۸	۱۵	۱۵	۲	۶	۱
HE- TUBE -7	TBF(h)	٤۲۰	۳۶۰	۳۵۰	۲۷۰	۲۰۰	۳۹۸	۳۷۰	۲۹۰	۲۹۰	۱۲۰
	TTR(h)	۳۷۰	۱۶۰	۲۰۰	۱۳۰	۱۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۱۹۰	۱۳۰	۱۲۰

درجدول(۲)، در هر ستون اسامی هر زیرسیستم نشان داده شده است و در هر سطر اطلاعات مربوط به نرخ خرابی[۲۸]، مدت زمان بین خرابی[۲۹] و مدت زمان تعمیر[۳۰] از هفت دستگاه مبدل‌حرارتی و طبق علامت‌های اختصاری انگلیسی آن‌ها و با استفاده از فرمول‌های بیان شده در بخش دوم و نرم‌افزار ایزوگراف مورد بررسی قرار گرفته است.

مفهوم TBF بیانگر فاصله زمانی بین خرابی‌های متوالی یک بخش یا قطعه قابل تعمیر از دستگاه می‌باشد [۴۳] که در شکل (۴) به آن اشاره شده است. همچنین TTR بیان‌گر مدت زمان مورد نیاز برای تعمیر بخش خراب شده است [۴۴].

شاخص TBF بیان می‌کند که در طول دوره‌ی عمر مفید دستگاه، در ازای چه مقدار ساعت کارکرد واقعی دستگاه، خرابی رخ داده است و اگر این شاخص بیشتر شود، بیانگر آن خواهد بود که ماشین به‌سوی ساعت عملیاتی بیشتر و خرابی کمتر پیش می‌رود. البته این شاخص به علت فرسودگی ماشین آلات و دستگاه‌ها و تجهیزات صنعتی می‌تواند سیر نزولی در پیش گیرد و در این مرحله است که طبق آمار و داده‌های گذشته می‌توان نتیجه گرفت که تعمیر یا تعویض قطعه یا دستگاه به عنوان راهکار مناسب اتخاذ شود.

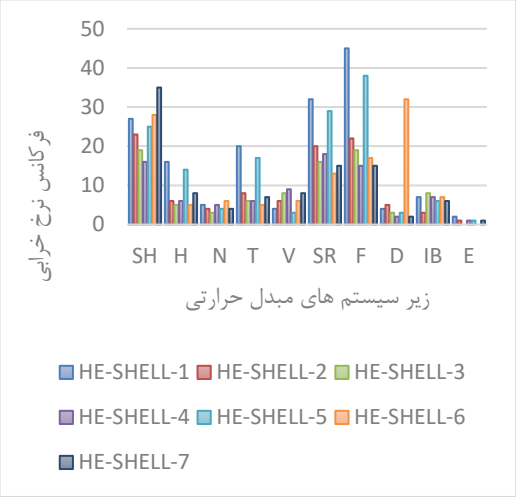


شکل (۴): نمودار مدت زمان بین خرابی دو دستگاه[۳۹]

برخی از مولفه‌های زیرسیستم دستگاه در طول بازرسی امکان تعمیر ندارند و قطعه کارایی لازم را ندارد و نیاز است تا با قطعه جدید جایگزین شود. به عنوان مثال در دستگاه مبدل حرارتی شماره ۵ در قسمت فرعی پوسته که با کد SH نشان داده شده است، شامل ۲۵ ٪ نرخ خرابی است که ۵۶۶ ساعت مدت زمان بین خرابی و ۲۵۰ ساعت مدت زمان بین تعمیر می‌باشد.

هدف نهایی از تعریف و محاسبه این شاخص، اندازه‌گیری میزان قابلیت اطمینان سیستم و نشان دادن افزایش یا کاهش قابلیت اطمینان اجزا، تجهیزات و قطعات است و در مجموع قطعه، تجهیز یا اجزایی که مدت زمان بین تعمیر بالاتری دارند، احتمال شکست یا خرابی کمتری در هر دوره خواهند داشت. واحد اندازه‌گیری این شاخص در استاندارد ISO14224 به‌صورت ساعت، روزانه، هفتگی، ماهانه و سالانه تعریف شده است، اما بهترین واحد اندازه‌گیری برای محاسبه و تحلیل هرچه بهتر این شاخص، ساعت است.

همچنین فرکانس خرابی‌های دستگاه مبدل‌حرارتی برای هر قسمت فرعی آن در شکل (۵) نشان داده شده است. این نمودار بیان بهتر برای خرابی هر زیر سیستم ارائه می‌دهد، به‌عنوان مثال در دستگاه مبدل‌حرارتی شماره ۱ در قسمت فیلتر که با کد (F) بیان شده است بیشترین نرخ خرابی ۴۵٪ را شامل می‌باشد.



شکل (۵): فرکانس خرابی‌های دستگاه مبدل‌حرارتی برای هر قسمت فرعی

۴- تخمین تابع چگالی احتمال و نرخ شکست

مقادیر نرخ شکست و تابع چگالی احتمال[۳۱] هر دستگاه مبدل حرارتی بر اساس داده‌های زمان تعمیر محاسبه شده است. تابع چگالی احتمال تابعی است که انتگرال آن در هر بازه معین، برابر با احتمال قرار داشتن متغیر تصادفی در آن بازه است. در تجهیزات صنعتی بسیاری از عوامل مانند زمان خرابی و از کار افتادگی دستگاه‌ها به صورت دقیق مشخص

[۲۸] Failure Rate(FR)
[۲۹] Time Between Failures (TBF)
[۳۰] Time To Repair(TTR)
[۳۱] Probability Density Function

نیســـتند، بنابراین این امکان وجود دارد که این عوامل را به صـورت متغیر تصـادفی تعریف کرد. در این صـورت با وجود اطلا عات و آ مار از نحوه کار م بدل های حراراتی می‌توان برآورد مناسبی از وضعیت و شرایط کاری آن‌ها بدست آورد. داده‌های بدســـت آمده شـــامل زمان حمل و نقل برای یک دستگاه یا قطعه خراب از محل کار آن به کارگاه، زمان واقعی نگهداری برای تعمیر یا قطعه تعمیر شده به محل ا صلی آن می‌باشـد. بر اسـاس بازرسـی‌های انجام شـده در اکثر مواقع تعمیر و تعویض قطعات در محل‌کار قابل انجام بوده اســـت. همان طور که در بخش ۲ توضـیح داده شـده اسـت، در این پژوهش از توزیع وایبل دو پارامتری: η پارامتر مقیاس و β پارامتر شکل استفاده شده است.

پارامترهای توزیع وایبل با ا ستفاده از ابزار نرم افزار-hazop v07 Isograph برآورد شده‌است. تخمین داده‌ها با استفاده از پارامترهای وایبل، در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): پارامترهای وایبل مبدل حرارتی

Machine ID	*Weibull Model*	*Weibull Parameter* (η=scale/life,β=shape)	
		η	B
HE-۱	P۲	۱٤٥/٥	۱/۰٥٤
HE-۲	P۲	۲۳۸/٥	۱/۹۰۲
HE-۳	P۲	۲٥۳/۷	۳/٤٦۲
HE-٤	P۲	۸۰/۳۸	۰/۷٦۸
HE-٥	P۲	٤۷۰/٤	۹/۲٥
HE-٦	P۲	۷۰/۷	۰/٥۷۸
HE-۷	P۲	۲۸۳/۳	۲/۳٥۲

مقادیر محاسبه شده نرخ شکست[۳۲] و تابع چگالی احتمال[۳۳] در جدول (۴) نشان داده شده ا ست. به عنوان نمونه در این جدول بیان شده است که دستگاه مبدل‌حرارتی شماره ۱ در قسمت فرعی فیلتر که با علامت اختصاری F نشان داده شده اســت، دارای نرخ خرابی ۰/۰۰۸۴در طول یک ســال و تابع چگالی احتمال ۰/۰۰۵۷ و مدت زمان بین خرابی آن ۴۳۲ ساعت می‌باشد و به همین ترتیب برای بقیه موارد بیان شده می‌توان تحلیل نمود. توزیع وایبل در تئوری قابلیت اطمینان کاربرد دارد و از این توزیع برای مدل‌ســـازی داده‌های زمان خرابی استفاده می‌شود. همچنین درصد قابلیت اطمینان هر زیر سیستم مربوط به مبدل‌حرارتی بر اساس عملکرد توزیع احتمال وایبل دو پارامتری و در جدول (۵) بیان شده است.

درصـــد مورد انتظار از فواصـــل زمانی نگهداری پیشـــگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان برای دستگاه‌های مبدل‌حرارتی در جدول (۶) نشان داده شده است. با استفاده از مقادیر بدست آمده تخمین زده می‌شـــود که اگر قابلیت اطمینان برای دستگاه مبدل حرارتی شماره ۱، ۹۰٪ باشد. برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه باید با فرکانس ۳۵ ساعت انجام شود. به طور مشـــابه، برای دســـتگاه مبدل حرارتی شـــماره ۲، با فرکانس هر ۵۲ ساعت، د ستگاه مبدل‌حرارتی شماره ۳، با فرکانس هر ۱۸ ساعت، د ستگاه مبدل‌حرارتی شماره ۴، با فرکانس هر ۲۴ ساعت، د ستگاه مبدل‌حرارتی شماره ۵، با فرکانس هر ۲۶ ساعت، د ستگاه مبدل حرارتی شماره ۶، با فرکانس هر ۲۹ ساعت و د ستگاه مبدل‌حرارتی شماره ۷، با فرکانس هر ۲۰ ســـاعت انجام شـــود. بقیه حالات قابلیت اطمینان به‌وضوح در جدول (۶) بیان شده است.

[۳۲] Failure rate

[۳۳] Probability Density Function

جدول (۴): فرکانس خرابی و تابع چگالی احتمال هر کدام از زیر سیستم‌های مبدل های حرارتی

Equipment ID		*SH*	*H*	*N*	*T*	*V*	*SR*	*F*	*D*	*IB*	*E*
HE- TUBE -1	FR(%)	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۳۴
	PDF	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۳۹
	TTR	۲۹۹	۱۴۳	۲۰۰	۱۲۱	۱۳۳	۳۲۰	۴۳۲	۲۱۱	۱۴۰	۱۰۰
HE- TUBE -2	FR	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۹	۰/۰۵۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۳۵
	PDF	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۲۸
	TTR	۳۲۰	۱۲۳	۱۲۳	۱۱۲	۱۴۴	۳۴۰	۴۳۰	۱۹۹	۱۲۰	۹۸
HE- TUBE -3	FR	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۶۹	۰
	PDF	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۳	۰
	TTR	۳۱۰	۱۱۳	۱۶۰	۱۰۰	۱۲۰	۳۲۰	۴۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۰
HE- TUBE -4	FR	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۷۳	۰/۰۶۸	۰/۰۷۸	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۶۲	۰/۰۷۸	۰/۰۰۶۹
	PDF	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۹
	TTR	۲۹۹	۱۳۳	۲۴۰	۱۴۰	۱۵۰	۳۰۰	۳۹۰	۱۹۰	۱۴۰	۹۰
HE- TUBE -5	FR	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۵۴
	PDF	۰/۰۴۳	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۴
	TTR	۲۵۰	۱۳۳	۱۹۹	۱۳۰	۱۲۰	۲۸۰	۴۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۱۰۰
HE- TUBE -6	FR	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۶	۰,۰۰۸۱	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۹	۰
	PDF	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۴۳	۰
	TTR	۳۹۰	۱۵۳	۱۹۰	۱۳۰	۱۲۰	۲۹۰	۳۲۰	۲۰۰	۱۳۰	۰
HE- TUBE -7	FR	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۶۹
	PDF	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۶
	TTR	۳۷۰	۱۶۰	۲۰۰	۱۳۰	۱۵۰	۳۰۰		۳۵۰	۱۹۰	۱۳۰

جدول (۵): درصد قابلیت اطمینان و عدم اطمینان مبدل حرارتی

Equipment ID		*SH*	*H*	*N*	*T*	*V*	*SR*	*F*	*D*	*IB*	*E*
HE- TUBE -1	FR	٦٥/٩٦	٥٧/٦٨	٦٠/٠١	٣٤/٠٦	٣٥/٠٧	٧٥/٩٦	٨٦/٠٦	٦١/٠١	٣٦/٧٦	٣٠/٠٧
	PDF	٥٥/٠٥	٢٢/٠٣	٣٢/٥٤	٥٥/٠٩	٥٧/٣٤	٥٩/٠٥	٤٥/٦٤	٣٢/٥٤	٥٧/٣٩	٤٠/٠٦
	TTR(h)	٢٩٩	١٤٣	٢٠٠	١٢١	١٣٣	٣٢٠	٤٣٢	٢١١	١٤٠	١٠٠
HE- TUBE -2	FR	٦٩/٨٦	٣٥/٠٦	٣٥/٠٦	٣٢/٤٥	٣٨/٠٩	٧٣/٨٦	٨٥/٧٦	٥٩/٠١	٣٤/٠٦	٢٩/٦٧
	PDF	٥٨/٠٥	٥٦/٠٩	٥٦/٠٩	٥٦/٠٩	٦٠/٠٨	٦٢/٠٥	٤٤/٦٦	٣٢/٥٤	٥٥/٠٩	٣٩/٥٦
	TTR(h)	٣٢٠	١٢٣	١٢٣	١١٢	١٤٤	٣٤٠	٤٣٠	١٩٩	١٢٠	٩٨
HE- TUBE -3	FR	٥٩/٣٦	٣٣/٠٧	٣٧/٨٩	٣٠/٠٧	٣٤/٠٦	٧٥/٩٦	٨٠/٩٤	٥٩/٠١	٣٤/٠٦	٠
	PDF	٤٨/٢٥	٤١/٠٦	٥٩/٤٢	٤٠/٠٦	٥٥/٠٩	٥٩/٠٥	٣٩/٧٦	٣٤/٦٤	٥٥/٠٩	٠
	TTR(h)	٣١٠	١١٣	١٦٠	١٠٠	١٢٠	٣٢٠	٤٢٠	٢٠٠	١٢٠	٠
HE- TUBE -4	FR	٤٩/٢٣	٣٦/٠٨	٤٠/٩٨	٣٦/٧٦	٣٢/٢٣٤	٧٣/٩٦	٧٤/٨٢	٥٨/٠٧	٣٦/٧٦	٢٠/٨٩
	PDF	٤٠/٨٧	٥٩/٥٣	٣٩/٥٥	٥٧/٣٩	٥٦/٦٢	٥٤/٠٥	٢٩/٤٦	٣٠/٦٥	٥٧/٣٩	٣٠/٦٦
	TTR(h)	٢٩٩	١٣٣	٢٤٠	١٤٠	١٥٠	٣٠٠	٣٩٠	١٩٠	١٤٠	٩٠
HE- TUBE -5	FR	٤٩/٩٨	٣٦/٠٨	٥٩/٠١	٣٥/٠٨	٣٤/٠٦	٦٥/٣٩	٨٠/٩٤	٥٩/٠١	٣٤/٠٦	٣٠/٠٧
	PDF	٤٠/٣٩	٥٩/٥٣	٣٠/٥٤	٥٨/٠٨	٥٥/٠٩	٤٤/٦٣	٣٩/٧٦	٣٤/٦٤	٥٥/٠٩	٤٠/٠٦
	TTR(h)	٢٥٠	١٣٣	١٩٩	١٣٠	١٢٠	٢٨٠	٤٢٠	٢٠٠	١٢٠	١٠٠
HE TUBE -6	FR	٧٤/٨٢	٣٢/٢٣٤	٥٨/٠٧	٣٥/٠٨	٣٤/٠٦	٦٥/٧٨	٥٤/٦٧	٥٩/٠١	٣٥/٠٨	٠
	PDF	٢٩/٤٦	٥٣/٦٥	٣٠/٦٥	٥٨/٠٨	٥٥/٠٩	٤٠/٤٣	٤٣/٩٣	٣٤/٦٤	٥٨/٠٨	٠
	TTR(h)	٣٩٠	١٥٣	١٩٠	١٣٠	١٢٠	٢٩٠	٣٢٠	٢٠٠	١٣٠	٠
HE- TUBE -7	FR	٦٨/٣٣	٣٧/٨٩	٥٩/٠١	٣٦/٠٨	٣٢/٢٣٤	٤٩/١٠	٥٠/٧٦	٥٨/٠٧	٣٥/٠٨	٣٤/٠٦
	PDF	٢٨/٣٢	٥٩/٤٢	٣٤/٦٤	٥٩/٥٣	٥٢/٦٢	٤٠/٩٣	٤٦/٣٩	٣٠/٦٥	٥٨/٠٨	٥٥/٠٩
	TTR(h)	٣٧٠	١٦٠	٢٠٠	١٣٠	١٥٠	٣٠٠	٣٥٠	١٩٠	١٣٠	١٢٠

جدول(۶): فواصل زمانی نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان برای هر دستگاه مبدل حرارتی

Reliability	*HE1*	*HE2*	*HE3*	*HE4*	*HE5*	*HE6*	*HE7*
٠/٩	٣٥	٥٢	١٨	٢٤	٢٦	٢٩	٢٠
٠/٨٥	٤٥	٦٧	٣٥	٢٥	٣٥	٤٠	٣٨
٠/٨	٥٢	٧٧	٤٣	٢٣	٤٤	٣٢	٢٤
٠/٧٥	٦٣	٩٠	٥٥	٢٦	٥٨	٦٠	٦٨
٠/٧	٧٤	٩٤	٦٦	٣٠	٦٩	٥٤	٥٠

۵- نتیجه‌گیری

با مرور پژوهش‌ها در حوزه بازرسی بر مبنای ریسک می‌توان نتیجه گرفت که از سال ۱۹۶۲، در صنایع پالایش نفت خام و پتروشیمی با گذشت زمان، هم تعداد حوادث و هم هزینه بوجود آمده افزایش یافته است و مهم‌ترین علل اتلاف، آسیب‌های مکانیکی هستند. به همین دلیل در این پژوهش به تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان دستگاه مبدل‌حرارتی از لحاظ خوردگی پرداخته شده است. توجه به موضوع نگهداری و تعمیرات مبتنی بر ریسک و افزایش قابلیت اطمینان دو موضوع بسیار مهم و حیاتی برای صنعت نفت است.

در این پژوهش رفتار خرابی هر یک از مبدل‌های حرارتی با استفاده تحلیل توزیع وایبل دو پارامتری محاسبه شده است. پارامترهای مورد بررسی، پارامتر مقیاس و شکل می‌باشند و نتایج با استفاده از تحلیل داده‌ها بدست آمده است. از آزمون‌های آماری جهت دقت بالاتر تحلیل داده‌ها استفاده می‌شود تا تشخیص رفتار خرابی و تعمیر دستگاه‌ها از دقت کافی برخوردار باشند.

روش پیشنهادی راهی برای کاهش تلفات آینده در دستگاه‌های مبدل حرارتی است و دستیابی به این اهداف از طریق نگهداری و تعمیرات بهینه فراهم می‌شود. در این پژوهش تمام انواع خرابی‌های مبدل‌حرارتی در نظرگرفته شده است که شامل خوردگی، سوراخ شدن، ترک، فرسایش، آسیب ارتعاشی، خرابی مکانیکی و نازک شدن لوله می‌باشد. با برنامه‌ریزی درست نگهداری و تعمیرات و اجرای به‌موقع آن می‌توان سبب افزایش عمر دستگاه شد. نتایج برای بدست آوردن قابلیت اطمینان ۹۰٪ برای هر ۷ دستگاه مبدل حرارتی در جدول شماره ۶ بیان شده است. لازم به ذکر است در این مطالعه عملکرد کلی تجهیزات در نظر گرفته نشده است.

این نتایج نشان می‌دهد که تکنولوژی‌های سنتی در مدیریت نمی‌توانند تضمین‌کننده ایمنی و کارکرد بدون حادثه واحدهای صنعتی باشند. پیدایش و توسعه مدیریت بازرسی بر مبنای ریسک نتیجه نگاه واقع‌گرایانه به چنین مسائلی می‌باشد. همچنین بازرسی بر مبنای ریسک در تعیین و شناسایی خطاهای طراحی قبل از وقوع حادثه مؤثر است. در حقیقت، برنامه بازرسی یکی از نتایج رویکرد پیشنهادی است. از جمله مواردی که به آن توجه اساسی شده است در نظر گرفتن موارد زیر می‌باشد: چه مواردی (کدام مؤلفه‌ها) جهت بازرسی باید بررسی‌گردد - چه نوع تکنیک بازرسی استفاده شود.

نتایج بر این نکته تاکید می‌کنند که بازرسی مستقیما باعث کاهش ریسک نمی‌شود، بلکه یک فعالیت مدیریتی ریسک بوده که می‌تواند باعث کاهش ریسک گردد. بازرسی در حین سرویس جهت تشخیص و پایش تخریب می‌باشد.

۶- منابع

[1] Tsarouhas, P. (2019). Improving operation of the croissant production line through overall equipment effectiveness (OEE). International.

[2] Zhu, X. (2011). Analysis and improvement of enterprise's equipment effectivenessbased on OEE. In Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on (pp. 4167-4171.

[3] Bhatia, K., Khan, F., Patel, H., & Abbassi, R. (2019). Dynamic risk-based inspection methodology. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 62, 103974.

[4] Purdy, G. (2010). ISO 31000: 2009 setting a new standard for risk management. Risk Analysis: An International Journal, 30(6), 881-886

[5] Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. Risk analysis, 1(1), 11-27.

[6] Magnusson, S. E., Frantzich, H., & Harada, K. (1996). Fire safety design based on calculations: unce rtainty analysis and safety verification. Fire Safety Journal, 27(4), 305-334

[7] Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., & He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. Safety science, 49(6), 852-860.

[8] Leva, M. C., Baldissone, G., Caso, R., Demichela, M., Lawlor, L., & Mcaleer, B. (2018). Cost benefit evaluation of maintenance options for aging equipment using monetised risk values: a practical application. Procedia Manufacturing, 19, 119-126

[9] Shayeri, J., (2007). Development of Computer-Aided Mainte-nance Resources Planning (CAMRP): A Case

of Multiple CNC Machining Centers, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23 (6), 614-623

[10] Tang, Y., Liu, Q., Jing, J., Yang, Y., & Zou, Z. (2017). A framework for identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance. Energy, 118, 1295-1303.

[11] Mohsin, K. M., Mokhtar, A. A., & Tse, P. (2019). A fuzzy logic method: Predicting corrosion under insulation of piping systems with modelling of CUI 3D surfaces. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 103929

[12] Vishnu, C. R., & Regikumar, V. (2016). Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. Procedia technology, 25, 1080-1087.

[13] Pui, G., Bhandari, J., Arzaghi, E., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2017). Risk-based maintenance of offshore managed pressure drilling (MPD) operation. Journal of Petroleum Science and Engineering, 159, 513-521.

[14] Dey, P. K., Ogunlana, S. O., & Naksuksakul, S. (2004). Risk-based maintenance model for offshore oil and gas pipelines: a case study. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 10(3), 169-183

[15] Petrović, D. V., Tanasijević, M., Milić, V., Lilić, N., Stojadinović, S., & Svrkota, I. (2014). Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic. Expert Systems with Applications, 41(18), 8157-8164.

[16] Marhavilas, P. K., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(5), 477-523.

[17] Florian, M., & Sørensen, J. D. (2017). Risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind farms. Energy Procedia, 137, 261-272.

[18] Shuai, J., Han, K., & Xu, X. (2012). Risk-based inspection for large-scale crude oil tanks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(1), 166-175.

[19] Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2007). Risk-based maintenance—Techniques and applications. Journal of hazardous materials, 142(3), 653-661

[20] Dey, P. K. (2001). A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 7(1), 25-43

[21] Guo, L., Gao, J., Yang, J., & Kang, J. (2009). Criticality evaluation of petrochemical equipment based on fuzzy comprehensive evaluation and a BP neural network. Journal of loss Prevention in the Process Industries, 22(4), 469-476.

[22] Tellez, R., Svrcek, W. Y., Ross, T. J., & Young, B. R. (2006). Heat exchanger network process modifications for controllability using design reliability theory. Computers & chemical engineering, 30(4), 730-743

[23] Prayogo, G. S., Haryadi, G. D., Ismail, R., & Kim, S. J. (2016, April). Risk analysis of heat recovery steam generator with semi quantitative risk based inspection API 581. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1725, No. 1, p. 020062). AIP Publishing.

[24] Carroll, J., McDonald, A., & McMillan, D. (2016). Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines. Wind Energy, 19(6), 1107-1119.

[25] Asadzadeh, Sh., (2019). Optimal Modeling and Forecasting of Equipment Failure Rate for the Electricity Distribution Network, Electric Industry Journal of Quality and Productivity,8 (1), 113-118.

[26] Khan, F. I., Sadiq, R., & Haddara, M. M. (2004). Risk-based inspection and maintenance (RBIM): multi-attribute decision-making with aggregative risk analysis. Process safety and environmental protection, 82(6), 398-411.

[27] Javid, Y. (2021). A bi-objective mathematical model to determine risk-based inspection program, Process Safety and Environmental Protection 146 (2021) 893–904

[28] Alavian, P., Eun, Y., Liu, K., Meerkov, S. M., & Zhang, L. (2019). The (α, β)-Precise Estimates of MTBF and MTTR:

Definitions, Calculations, and Induced Effect on Machine Efficiency Evaluation. IFAC-Papers On Line, 52(13), 1004-1009.
[29] Zagirnyak, M., & Prus, V. (2016). Use of neuronets in problems of forecasting the reliability of electric machines with a high degree of mean time between failures. Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review), 92(1), 132-135.
[30] Mortazavi, S. M., Mohamadi, M., & Jouzdani, J. (2018). MTBF evaluation for 2-out-of-3 redundant repairable systems with common cause and cascade failures considering fuzzy rates for failures and repair: a case study of a centrifugal water pumping system. Journal of Industrial Engineering International, 14(2), 281-291.
[31] Vagenas, N., Runciman, N., & Clément, S. R. (1997). A methodology for maintenance analysis of mining equipment. International Journal o/Surface Mining, Reclamation and Environment, 11(1), 33-40.
[32] Dolas, D. R., Jaybhaye, M. D., & Deshmukh, S. D. (2014). Estimation the system reliability using Weibull distribution. International Proceedings of Economics Development and Research, 75, 144.
[33] Xie, M., & Lai, C. D. (1996). Reliability analysis using an additive Weibull model with bathtub-shaped failure rate function. Reliability Engineering & System Safety, 52(1), 87-93.
[34] Rachman, A., & Ratnayake, R. C. (2019). Machine learning approach for risk-based inspection screening assessment. Reliability Engineering & System Safety, 185, 518-532.
[35] Luque, J., & Straub, D. (2019). Risk-based optimal inspection strategies for structural systems using dynamic Bayesian networks. Structural Safety, 76, 68-80.
[36] Hewitt, G. F., Shires, G. L., & Bott, T. R. (1994). Process heat transfer (Vol. 113, p. 263). Boca Raton, FL CRC press
[37] Klutke, G. A., Kiessler, P. C., & Wortman, M. A. (2003). A critical look at the bathtub curve. IEEE Transactions on reliability, 52(1), 125-129
[38] Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., & He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. Safety science, 49(6), 852-860
[39] Mukherjee, R. (1998). Effectively design shell-and-tube heat exchangers. Chemical Engineering Progress, 94(2), 21-37.
[40] Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., & Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention in the process industries, 15(4), 291-303.
[41] American Petroleum Institute, Second Edition November 2008: "Risk-Based Inspection", API 581
[42] Simeone, A., Watson, N., Sterritt, I., & Woolley, E. (2016). A multi-sensor approach for fouling level assessment in clean-in-place processes. Procedia Cirp, 55, 134-139.
[43] Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain. Kogan Page Publishers.
[44] Dhillon, B. S. (2008). Mining equipment reliability (pp. 57-70). Springer London