

پروژه درسی قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک

دانشگاه صنعتی شریف_دانشکده مهندسی انرژی

عنوان پروژه:

مدلسازی قابلیت اطمینان در سیستم بخار مصرفی در صنایع غذایی

استاد:

دکتر عباس رجبی قهنویه

دانشجو:

شایان محمددینی

تابستان ۱۴۰۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

در سیستم‌های صنعتی ایمنی و قابلیت اطمینان فرآیندها و اجزاء تشکیل دهنده هر دستگاه، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، زیرا وقوع خرابی‌ها بعضاً باعث به وجود آمدن خسارات جانی و اقتصادی جبران‌ناپذیر فراوانی می‌گردد. قابلیت اطمینان به عنوان احتمال اینکه یک محصول، سیستم یا خدمات، عملکرد مورد نظر خود را به اندازه کافی برای یک دوره زمانی مشخص انجام دهد یا در یک محیط تعریف شده بدون خرابی عمل کند، تعریف می‌شود. بررسی قابلیت اطمینان در صنایع غذایی به خاطر فراوانی وجود فرآیندهای متوالی، حائز اهمیت می‌باشد، زیرا به وقوع پیوستن یک خرابی در یک بخش سیستم، می‌تواند کل یک فرآیند را مختل نماید و خسارات اقتصادی زیادی را به بار بیاورد.

هدف از انجام این مطالعه و پژوهش، بررسی و مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم‌های بخار در صنایع غذایی و پیدا کردن بیشترین حالات خرابی در این حوزه و راه‌های جلوگیری و کاهش آن‌ها می‌باشد. مهم‌ترین جزء در تولید بخار در صنایع غذایی بویلرهای بخار یا همان دیگ‌های بخار می‌باشند. تحقیقات زیادی در حوزه مدلسازی قابلیت اطمینان در صنایع غذایی مختلف انجام شده است، در حالی که در زمینه سیستم‌های بخار در صنایع غذایی تحقیقات کمتری وجود دارد، بنابراین در این مطالعه بیشتر از پژوهش‌هایی که در زمینه مدلسازی قابلیت اطمینان بر روی دیگ‌های بخار در صنایع مختلف انجام شده است، استفاده می‌شود و با توجه به اینکه شاهد یک ساختار تقریباً مشابه بین دیگ‌های بخار صنایع متفاوت می‌باشیم، این مطالعه به این روش انجام شده است.

در ابتدای این پژوهش به معرفی کامل سیستم‌های بخار در صنایع غذایی و کاربردها پرداخته شده است و در ادامه به بررسی کامل روش‌ها و نتایج مدلسازی قابلیت اطمینان در دیگ‌های بخار در دو مقاله سویوگ (۲۰۲۱) و ایینگ (۲۰۲۰) و همچنین بررسی مختصر و معرفی بیشتر چهار مقاله دیگر پرداخته شده است که از جمله روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده شده در این مقالات عبارت‌اند از: روش استفاده از نظر متخصصان (Expert judgment method)، زنجیره مارکوف، تئوری گراف و درخت خطا (Fault Tree) و برخی دیگر از روش‌ها. در نهایت این نتیجه حاصل شده است که بیشتر شاهد خرابی اجزاء گوناگون سیستم احتراق، سیستم تغذیه آب، جداکننده سیکلون، فن هوای اولیه، تغذیه زغال سنگ، فن القایی و برخی دیگر از سیستم‌ها می‌باشیم که باعث کاهش قابلیت اطمینان کل سیستم می‌شود. همچنین این نتیجه حاصل شده است که انجام تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، در افزایش قابلیت اطمینان دیگ‌های بخار بسیار موثر و حائز اهمیت می‌باشد، در حالی که انجام تعمیرات اصلاحی تاثیر کمتری دارد.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، صنایع غذایی، سیستم‌های بخار، دیگ‌های بخار، روش استفاده از نظر متخصصان، زنجیره مارکوف، تئوری گراف، درخت خطا، تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه

فهرست مطالب

| | |
|--|----|
| چکیده | ۳ |
| مقدمه | ۹ |
| کاربرد دیگ بخار (سیستم‌های بخار) در صنایع غذایی | ۱۰ |
| کاربرد دیگ بخار (بویلر صنعتی) در صنایع غذایی تولید کیک و شکلات | ۱۰ |
| کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید فرآورده‌های لبنی | ۱۰ |
| کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید سس و رب گوجه‌فرنگی | ۱۲ |
| کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید قند | ۱۲ |
| کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی پرورش قارچ | ۱۲ |
| انواع دیگ بخار | ۱۳ |
| دیگ بخار فایرتیوب | ۱۳ |
| دیگ بخار واترتیوب | ۱۳ |
| نحوه کار دیگ های بخار | ۱۵ |
| تفاوت دیگ بخار (Steam boiler) و مولد بخار (Steam generator) | ۱۵ |
| مزایای دیگ بخار در برابر مولد بخار | ۱۶ |
| مهم‌ترین عوامل در انتخاب دیگ بخار صنایع غذایی | ۱۶ |
| کیفیت و خلوص بخار | ۱۶ |
| نکات فنی در خصوص استفاده دستگاه دیگ بخار در صنایع غذایی | ۱۷ |
| فرایندهایی که بخار در آن‌ها کاربرد دارد | ۱۸ |
| استریل کردن و ضد عفونی کردن | ۱۸ |
| کاهش خطرات میکروبیولوژیکی | ۱۸ |
| پخت و پز و خشک کردن | ۱۸ |
| گرمایش تاسیسات | ۱۹ |
| سوخت مورد استفاده در دیگ‌های بخار مواد غذایی | ۱۹ |
| اجزاء مختلف سازنده یک بویلر | ۲۰ |
| مشعل (Burner) | ۲۰ |
| مبدل حرارتی (Heat exchanger) | ۲۰ |
| خطوط تامین (Supply lines) | ۲۰ |

| | |
|----|--|
| ۲۰ | خطوط برگشت (Return lines)..... |
| ۲۰ | محفظه احتراق (Firebox)..... |
| ۲۱ | عایق نسوز (Refractory)..... |
| ۲۱ | پمپ‌های سیرکولاتور (Circulator pumps)..... |
| ۲۱ | هواگیر / کندانسور (Deaerators/Condenser)..... |
| ۲۱ | اکنونومایزر (Economizer)..... |
| ۲۲ | مباحث مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های بخار..... |
| ۲۲ | بخش اول: بررسی دو مقاله جامع و کامل در زمینه قابلیت اطمینان بویلرها و روش‌شناسی آنها..... |
| ۲۲ | مقاله اول..... |
| ۲۲ | توضیحات مقاله اول..... |
| ۲۴ | روش تحقیق و پژوهش در این مقاله..... |
| ۲۶ | نحوه جمع‌آوری داده‌ها در این مقاله..... |
| ۲۷ | تست روند (Trend test)..... |
| ۲۹ | تست مناسب بودن برازش داده‌ها..... |
| ۳۲ | تجزیه و تحلیل در دسترس بودن..... |
| ۳۶ | نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله اول..... |
| ۳۷ | جدول توضیحات حروف مخفف..... |
| ۳۷ | مقاله دوم..... |
| ۳۷ | توضیحات مقاله دوم..... |
| ۳۸ | روش انجام تحقیق در این مقاله..... |
| ۳۹ | توضیحات و مراحل این تحقیق در این مقاله..... |
| ۴۱ | آنالیز ریسک..... |
| ۴۲ | ارزیابی و محاسبات قابلیت اطمینان..... |
| ۴۴ | تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان..... |
| ۴۵ | نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله دوم..... |
| | بخش دوم: معرفی و بررسی چند مقاله بطور خلاصه در زمینه قابلیت اطمینان بویلرها در صنایع مختلف و روش‌شناسی آنها..... |
| ۴۵ | |
| ۴۵ | مقاله سوم..... |

| | |
|----|--------------------------------------|
| ۴۵ | روش تحقیق در این مقاله..... |
| ۴۷ | رسم نمودار مارکوف و معادلات..... |
| ۴۹ | نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله سوم..... |
| ۵۰ | مقاله چهارم..... |
| ۵۰ | روش تحقیق در این مقاله..... |
| ۵۱ | مقاله پنجم..... |
| ۵۱ | روش تحقیق در این مقاله..... |
| ۵۲ | مقاله ششم..... |
| ۵۲ | روش تحقیق در این مقاله..... |
| ۵۳ | جمع بندی..... |
| ۵۴ | مراجع و منابع..... |

فهرست اشکال

| | |
|--|----|
| شکل ۱ فرآیند تولید شیر و کاربرد بخار در آن [4] | ۱۲ |
| شکل ۲ شماتیک یک بویلر واتر تیوب [6] | ۱۴ |
| شکل ۳ شماتیک یک بویلر فایر تیوب [6] | ۱۴ |
| شکل ۴ کیفیت و خلوص مورد نیاز بخار آب در صنایع مختلف [21] | ۱۷ |
| شکل ۵ مقدار استفاده از انواع سوخت‌ها در بویلرهای صنایع غذایی جهان [8] | ۱۹ |
| شکل ۶ نحوه کار هواگیر و کندانسور [9] | ۲۲ |
| شکل ۷ روش انتخاب مدل زمان تا شکست (TTF) [10] | ۲۶ |
| شکل ۸ تجزیه و تحلیل فراوانی خرابی زیرسیستم‌های دیگ بخار [10] | ۲۷ |
| شکل ۹ سمت چپ: نمودارهای تست روند برای ECS و FSS، سمت راست: نمودارهای تست همبستگی سریال برای ECS و FSS [10] | ۲۹ |
| شکل ۱۰ نمودار اهمیت قابلیت اطمینان برای زیرسیستم‌های دیگ بخار [10] | ۳۴ |
| شکل ۱۱ شماتیک بلوک دیاگرام بویلر در این مقاله | ۳۵ |
| شکل ۱۲ نمودار جریان تحقیق در این مقاله [16] | ۳۸ |
| شکل ۱۳ سطح اولویت ریسک (RPN) اجزای حیاتی بویلر [16] | ۴۱ |
| شکل ۱۴ تعداد خرابی اجزاء حیاتی دیگ بخار [16] | ۴۲ |
| شکل ۱۵ نمودار انتقال سیستم این بویلر (زنجیره مارکوف) [17] | ۴۸ |
| شکل ۱۶ یکی از گراف‌های رسم شده در این مقاله [18] | ۵۰ |
| شکل ۱۷ نمودار مارکوف ترسیم شده برای سیستم چرخش هوا در بویلر در این مقاله [19] | ۵۱ |
| شکل ۱۸ یکی از درخت‌های خطا رسم شده در این مقاله [20] | ۵۲ |

فهرست جداول

| | |
|---|----|
| جدول ۱ زیرسیستم‌های در نظر گرفته شده برای یک بویلر و سیستم بخار [1]..... | ۲۵ |
| جدول ۲ بهترین نتایج توزیع سطح زیرسیستم‌های دیگ بخار [10]..... | ۳۰ |
| جدول ۳ نتایج بهترین توزیع در سطح جزء در سیستم بویلر [10]..... | ۳۱ |
| جدول ۴ عمر مورد انتظار (MTBF)، عمر طراحی و قابلیت اطمینان زیرسیستم های دیگ بخار [10]..... | ۳۳ |
| جدول ۵ قابلیت اطمینان سیستم بویلر از طریق قابلیت اطمینان زیرسیستم [10]..... | ۳۴ |
| جدول ۶ تجزیه و تحلیل قابلیت نگهداری و در دسترس بودن زیرسیستم های دیگ بخار [10]..... | ۳۴ |
| جدول ۷ قابلیت اطمینان، عمر قابل اعتماد، و MTBF اجزای دیگ بخار [10]..... | ۳۵ |
| جدول ۸ حروف مخفف استفاده شده و اسم کامل آنها..... | ۳۷ |
| جدول ۹ تجزیه و تحلیل حالت و اثر شکست (FMEA) اجزای حیاتی بویلر [16]..... | ۳۹ |
| جدول ۱۰ شماره اولویت ریسک (RPN) اجزای حیاتی دیگ [16]..... | ۴۰ |
| جدول ۱۱ خلاصه آزمایش توزیع و پارامترها برای زمان تا شکست (TTF) [16]..... | ۴۳ |
| جدول ۱۲ خلاصه آزمایش توزیع و پارامترها برای زمان تعمیر (TTR) [16]..... | ۴۳ |
| جدول ۱۳ خلاصه نتایج محاسبات از MTTR، MTTF و قابلیت اطمینان اجزاء حیاتی بویلر [16]..... | ۴۴ |

بررسی و مدلسازی قابلیت اطمینان در مبحث مدیریت فرآیندهای صنایع غذایی، به عنوان یک شاخص مهندسی، نقش مهمی را در بهبود اثربخشی و نیز کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های صنایع غذایی دارد. با توجه به اهمیت قابلیت دسترس‌پذیری تجهیزات صنایع غذایی در تولید و فرآوری نهایی محصولات و نیز توسعه پژوهش‌ها در زمینه برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات در صنایع تبدیلی کشاورزی و صنعت غذا به ویژه در ایران، هدف از این پژوهش مرور، بررسی و ارائه انواع روش‌های مدلسازی قابلیت اطمینان و شاخص‌های مرتبط با آن برای سیستم‌های بخار و دیگ‌های بخار در صنایع غذایی می‌باشد و به طور کلی با توجه به وجود شباهت بین دیگ‌های بخار در صنایع مختلف، به بررسی قابلیت اطمینان دیگ‌های بخار در صنایع پرداخته می‌شود. البته در ابتدا به بیان و معرفی کامل سیستم‌های بخار در صنایع غذایی و کاربردها و انواع آنها، پرداخته خواهد شد.

با توجه به این که کارخانجات صنایع غذایی اکثراً دارای یک سری فرآیندهای متوالی می‌باشند، خرابی یا از کار افتادگی یک جزء می‌تواند خسارات اقتصادی بسیاری را به این صنایع تحمیل نماید، به عنوان مثال می‌تواند باعث از بین رفتن مقادیر زیادی از مواد اولیه بشود. که به تبع آن، اهمیت قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری در این صنایع آشکار می‌شود. از این رو ضرورت انجام این پژوهش و مطالعه مشخص می‌گردد.

مطالعات زیادی در زمینه قابلیت اطمینان دیگ‌های بخار انجام شده‌اند که به بررسی عوامل خرابی و راهکارهای جلوگیری یا کاهش آنها و همچنین مدلسازی این موارد به روش‌های گوناگون پرداخته‌اند. در مطالعه سویوگ و همکاران که در سال ۲۰۲۱ انجام شده است به بررسی، تجزیه و تحلیل در دسترس بودن سیستم‌های بخار پرداخته شده است که در این مطالعه از روش استفاده از نظر متخصصان استفاده شده است و در نهایت یک مدل کامل برای این سیستم بدست آمده است [10] که در ادامه پژوهش حاضر به تفصیل به بیان جزئیات آن پرداخته شده است. همچنین در مطالعه ایبینگ و همکاران در سال ۲۰۲۰، نیز به بررسی عوامل خرابی دو واحد دیگ بخار مجزا و مقایسه آنها و همچنین مدلسازی قابلیت اطمینان در آنها پرداخته شده است [16] که در ادامه پژوهش حاضر به تفصیل به بیان جزئیات این مطالعه نیز پرداخته شده است.

در این پژوهش سعی شده است با مرور، بررسی و معرفی برخی از روش‌های گوناگون مدلسازی قابلیت اطمینان در سیستم‌های بخار صنایع گوناگون در مطالعات گذشته و همچنین معرفی جزئیات مهم در سیستم‌های بخار صنایع غذایی و انواع آنها و همچنین کاربردهای آنها، یک روش‌شناسی و آشنایی کلی با موارد ذکر شده و نحوه مدلسازی قابلیت اطمینان در سیستم‌های بخار بدست آید.

کاربرد دیگ بخار (سیستم‌های بخار) در صنایع غذایی

یکی از المان‌های تولید محصول باکیفیت و مهم‌ترین بخش صنایع غذایی دیگ بخار می‌باشد. همچنین دیگ بخار در صنایع غذایی دارای کاربردهای متنوعی می‌باشد. تولید بخار صرفاً برای پخت‌وپز در صنایع غذایی استفاده نمی‌شود، بلکه یکی کوچک‌ترین کاربردهای دیگ بخار در صنایع غذایی برای پخت‌وپز می‌باشد. دیگر کاربردهای دیگ بخار در صنایع غذایی عبارت‌اند از: ضدعفونی کردن و استریل کردن، بسته‌بندی کنسروهای خوراکی، شستشو و تمیز کردن، رطوبت زنی، گرمایش محیط، حرارت دادن و کنترل دما می‌باشد [1]. در این پژوهش، ابتدا به معرفی کاربرد سیستم‌های بخار در صنایع غذایی مختلف و انواع دیگ‌های بخار و تجهیزات آنها می‌پردازیم و در ادامه پس از آشنایی با انواع کاربردها و تجهیزات مختلف به بررسی قابلیت اطمینان این سیستم‌ها می‌پردازیم.

از آنجا که انرژی حرارتی بخار بسیار زیاد می‌باشد و به دلیل تراکم پایینی که دارد سرعت حرکت بالایی دارد و به نسبت آب و روغن راحت‌تر حرکت می‌کند. همچنین برای حرکت روغن و آب نیاز به پمپ می‌باشد در حالی که بخار با فشار خود دیگ بخار انتقال پیدا می‌کند. همچنین درجه حرارت بخار به نسبت آب داغ بیشتر است و در مقایسه با دیگ روغن داغ هزینه بهره‌برداری پایین‌تری دارد به همین دلیل در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی دیگ‌های بخار کاربرد بیشتری دارند [2].

همان‌طور که گفته شد دیگ بخار نه تنها برای پخت‌وپز در صنایع غذایی کاربرد دارد. بلکه جهت تولید انواع فرآورده‌های مختلف نیز کاربرد دارد. از جمله این فرآورده‌ها عبارت‌اند از: پرورش قارچ، تولید کیک و کلوچه، تولید گیاهان گلخانه‌ای، تولید رب و سس گوجه‌فرنگی، تولید فرآورده‌های لبنی، تولید قند می‌باشد.

کاربرد دیگ بخار (بویلر صنعتی) در صنایع غذایی تولید کیک و شکلات

اصلی‌ترین کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید کیک و کلوچه، تولید حرارت جهت پخت کیک و کلوچه می‌باشد. همچنین به منظور غلیظ کردن مایع شکلات از بخار استفاده می‌شود. بعد از غلیظ شدن مایع شکلات آن را در قالب‌های مخصوص ریخته و سپس به گرم‌خانه ارسال می‌کنند. برای تولید حرارت گرم‌خانه و غلیظ کردن شکلات از بخار استفاده می‌شود. دیگر کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید کیک و شکلات علاوه بر تولید حرارت جهت پخت کیک و غلیظ و رقیق کردن شکلات برای بسته‌بندی نیز کاربرد دارد.

کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید فرآورده‌های لبنی

برای تولید فرآورده‌های لبنی مانند ماست و پنیر و تولید آنها توسط شیر نیاز به حرارت‌دهی شیر وجود دارد. تأمین این حرارت توسط دیگ بخار صورت می‌گیرد. پس از اتمام مراحل اولیه تولید ماست و پنیر توسط شیر، نیاز به گرم‌خانه جهت تکمیل فرآیند تبدیل شیر به ماست و پنیر وجود دارد. در گرم‌خانه‌ها از دیگ بخار برای

تولید حرارت مورد نیاز گرمخانه استفاده می‌شود. همچنین برای تولید شیر خشک نیز از بویلر صنعتی بهره می‌گیرند. دیگر کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید فرآورده‌های لبنی، برای پاستوریزه کردن و هموژنیزه کردن شیر نیز از بخار تولید شده توسط دیگ بخار استفاده می‌شود. دیگ بخار در تولید فرآورده‌های لبنی کاربردهای بسیار دیگری نیز دارد که در این بخش به برخی از آنها اشاره شد [1].

همان طور که مشخص شد، کاربرد دیگ بخار در صنایع لبنی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. دیگ بخار در صنایع لبنی، بیشترین انرژی حرارتی مصرفی در فرآیند تولید را، استفاده می‌کند. بنابراین بخش قابل توجهی از استفاده از سوخت فسیلی در کارخانجات شیر، عمدتاً مربوط به دیگ‌های بخار می‌باشد. البته مقداری سوخت فسیلی نیز جهت نیروگاه‌های تولید برق اضطراری در این کارخانجات، به کار برده می‌شود.

مصرف بخار تولید شده در کارخانجات لبنی عموماً به صورت‌های زیر می‌باشد:
الف - در دستگاه‌های پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون و هموژنیزه نمودن شیر

ب - در گرمخانه‌های مورد استفاده برای تولید ماست و پنیر

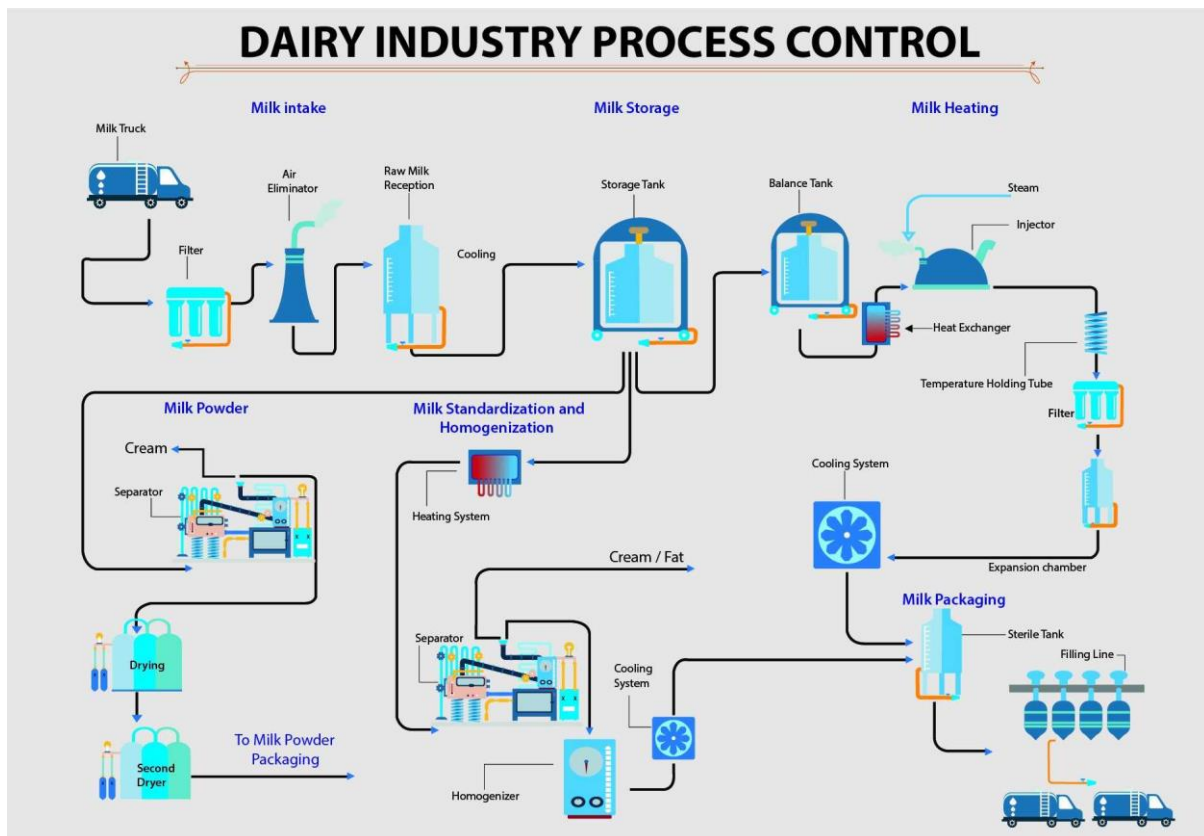
ج - در مبدل‌های حرارتی برای گرم نمودن آب مصرفی و همچنین شوینده‌های بازی و اسیدی که در شستشوی مسیرها، تانک‌ها، پاستوریزاتورها، سبدها و بطری‌ها بکار می‌رود.

د - در پیش‌گرمکن‌ها و اواپراتورهای تولید شیر خشک

ه - در رادیاتور تولید هوای داغ یا بخار خشک مورد نیاز در خشک کن پاششی در واحد تولید شیر خشک (Spray dryer)

بعضی از کارخانجات شیر، در پروسه تولید شیر خشک برای گرم نمودن هوای داغ که برای خشک کن پاششی مورد نیاز است، از گرمکن یا هیتر غیر مستقیم استفاده می‌کنند و در این گرمکن‌ها سوخت فسیلی به صورت مستقیم در مشعل گرمکن بکار می‌رود [3].

به عنوان مثال در شکل (۱) کاربرد بخار را در مبدل‌های حرارتی فرآیند تولید شیر، مشاهده می‌کنیم.



شکل ۱ فرآیند تولید شیر و کاربرد بخار در آن [4]

کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید سس و رب گوجه‌فرنگی

تولید رب گوجه‌فرنگی نیاز به حرارت زیادی دارد، به صورتی که بعد از تبدیل گوجه‌فرنگی به تیکه‌های کوچک یا اصطلاحاً پوره کردن و له کردن گوجه‌فرنگی، باید آن را با حرارت مناسب به رب گوجه‌فرنگی تبدیل نمود. جهت تولید حرارت کافی برای درست کردن رب گوجه‌فرنگی از دیگ بخار استفاده می‌شود.

کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی تولید قند

برای تولید قند ابتدا باید شربت قند را توسط آب و شکر درست نمود. سپس برای غلیظ شدن آن باید از حرارت استفاده نمود تا بتوان آن را درون قالب ریخت سپس قالب‌ها را به گرم‌خانه ارسال می‌کنند تا قند تولید شود. برای تولید حرارت جهت غلیظ شدن شربت قند و حرارت گرم‌خانه از دیگ بخار استفاده می‌شود.

کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی پرورش قارچ

در پرورش قارچ نیاز به حفظ رطوبت و کنترل دمای محیط می‌باشد. در پرورش قارچ جهت حفظ رطوبت و کنترل دما از دیگ بخار استفاده می‌شود. یکی دیگر از کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی پرورش قارچ

ضد عفونی کردن و از بین بردن باکتری‌ها می‌باشد. استفاده از دیگ بخار جهت پرورش قارچ بسیار مقرون به صرفه‌تر از روش‌های دیگر است [1].

باید توجه داشت که علاوه بر موارد ذکر شده، در بیشتر صنایع غذایی که نیاز به حرارت یا رطوبت باشد می‌توان از دیگ بخار استفاده نمود.

انواع دیگ بخار

دیگ‌های بخار انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها عبارت‌اند از:

دیگ‌های فایرتیوب (Firetube) و دیگ‌های واترتیوب (Watertube).

دیگ بخار فایرتیوب

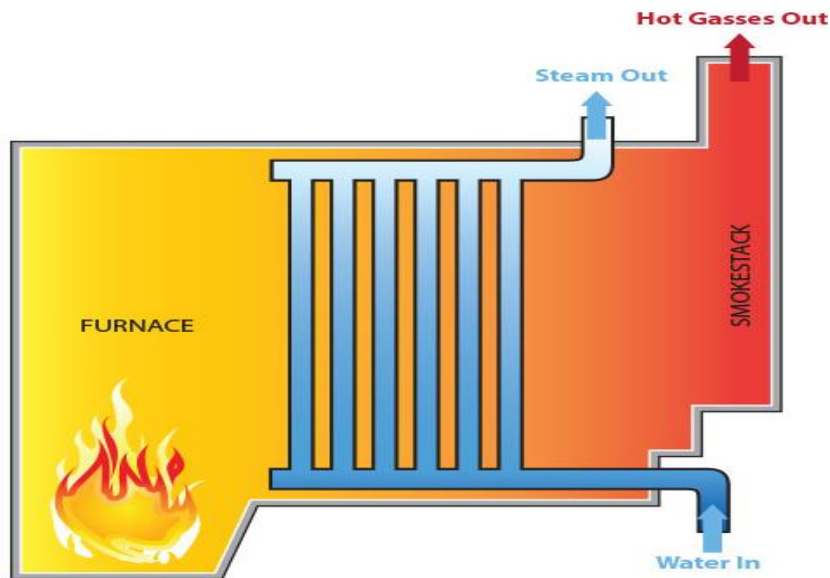
در این نوع دیگ بخار، گازهای حاصل از احتراق در داخل لوله‌ها جریان یافته و گرما را به آب منتقل می‌کنند. تعداد دفعاتی که گاز در اطراف ظرف جریان می‌یابد تا گرما را به آب منتقل کند، یکی از ویژگی‌های این دیگ‌ها می‌باشد.

دیگ بخار واترتیوب

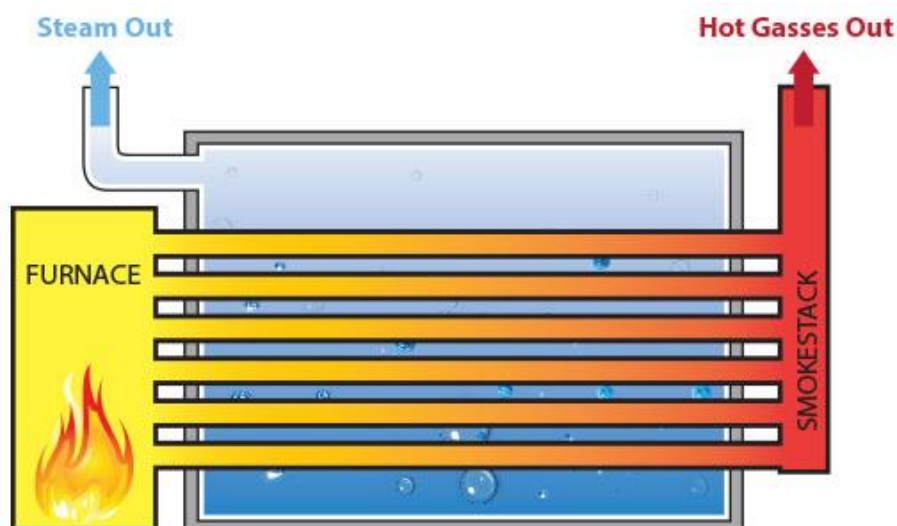
در این نوع دیگ بخار، لوله‌ها حاوی آب هستند و گازهای خروجی در قسمت پوسته‌ای هستند که از اطراف سطح لوله عبور می‌کنند تا بر دمای آب داخل لوله‌ها تأثیر بگذارند. دیگ‌های واترتیوب در مکان‌هایی استفاده می‌شوند که فشار بخار بالایی دارند زیرا می‌توانند فشار داخلی بالاتری را نسبت به پوسته‌های محفظه‌ای در نوع فایرتیوب تحمل کنند. فشار بخار برای این نوع می‌تواند تا ۳۰۰۰ psi یا گاهی حتی بیشتر باشد.

بویلرهای واترتیوب همچنین قادر به تولید بخار اشباع یا فوق گرم برای مصارف مختلف به ویژه برای فرآیندهایی هستند که شامل بخار خشک، انرژی بالا و فشار بالا مانند تولید برق توربین بخار می‌باشند [5].

شکل (۲) و (۳) به ترتیب شماتیک بویلرهای واترتیوب و فایرتیوب را نمایش می‌دهند.



شکل ۲ شماتیک یک بویلر واترتیوب [6]



شکل ۳ شماتیک یک بویلر فایرتیوب [6]

دیگ‌های مختلف ممکن است طراحی‌های متفاوتی داشته باشند، اما سه قسمت اصلی در طرح‌های مختلف یکسان باقی می‌مانند: محفظه احتراق، مبدل حرارتی و مشعل. حال به طور مختصر به توضیح هر یک می‌پردازیم.

۱. محفظه احتراق

این محفظه که معمولاً از چدن ساخته می‌شود محل سوزاندن سوخت می‌باشد. گرمایی که این محفظه تولید می‌کند به قسمت مبدل حرارتی سیستم منتقل می‌شود. به علاوه، دمای داخل محفظه احتراق را می‌توان تا چند صد درجه در مدت زمان کوتاهی افزایش داد.

۲. مبدل حرارتی

مجموعه‌ای از لوله‌های آب اطراف محفظه احتراق را در یک سیستم دیگ بخار را گویند که در مرحله بعد، آب در حال جوشیدن یا بخار که تحت فشار قرار گرفته است، از طریق لوله‌ها به بخاری یا رادیاتور پمپ می‌شود و انرژی گرمایی تولید شده در دیگ از آب یا بخار جدا می‌شود.

۳. مشعل

هنگامی که سیستم برای تولید گرما مورد نیاز می‌باشد، ترموستات سیگنال‌های الکترونیکی را به مشعل ارسال می‌کند تا واکنش احتراق را فعال کند. مشعل قسمتی است که واکنش احتراق را در داخل دیگ شروع می‌کند. یک منبع بیرونی با کمک مکانیزمی، سوخت را به دیگ پمپ می‌کند. منبع سوخت اغلب در یک مخزن سوخت مجاور قرار دارد. سپس سوخت با کمک نازل مشعل به اسپری ریز تبدیل می‌شود و مشتعل می‌شود که در محفظه احتراق واکنش ایجاد می‌کند [5].

نحوه کار دیگ های بخار

دیگ های بخار عمدتاً به این ترتیب کار می‌کنند که آنها یک واکنش احتراق بین سوخت و هوا ایجاد می‌کنند تا شعله را در لوله‌های مختلف مشتعل کنند. گرمای حاصل از این واکنش از لوله‌ها به آب منتقل می‌شود و آب به بخار تبخیر می‌شود. سپس بخار تولید شده برای یک کاربرد گرمایشی خاص استفاده خواهد شد. سپس بخار به عنوان میعانات به داخل منبع آب، متراکم می‌شود و می‌توان آن را جمع آوری کرد و به دیگ برگرداند.

تفاوت دیگ بخار (Steam boiler) و مولد بخار (Steam generator)

بسیاری از افراد غیرمتخصص تصور می‌کنند این دو یکسان هستند، اما کمی متفاوت می‌باشند. ژنراتورهای بخار در مقایسه با دیگ‌های بخار، در طراحی خود حاوی فولاد کمتری هستند و به جای لوله‌های دیگ از یک سیم پیچ تک لوله‌ای استفاده می‌کنند و یک پمپ تغذیه به طور مداوم آب را از طریق کویل، پمپ می‌کند. ژنراتورهای بخار آب را به بخار تبدیل می‌کنند اما معمولاً مستقیماً از سوخت برای این کار استفاده نمی‌کنند [5].

از طرف دیگر ژنراتورهای بخار کوچکتر از دیگ‌های بخار هستند زیرا از هیچ مخزن فشاری استفاده نمی‌کنند. اما تفاوت اصلی این است که ژنراتورهای بخار دارای نرخ پایین هستند و توانایی کمتری در تامین بخار دارند [5].

مزایای دیگ بخار در برابر مولد بخار

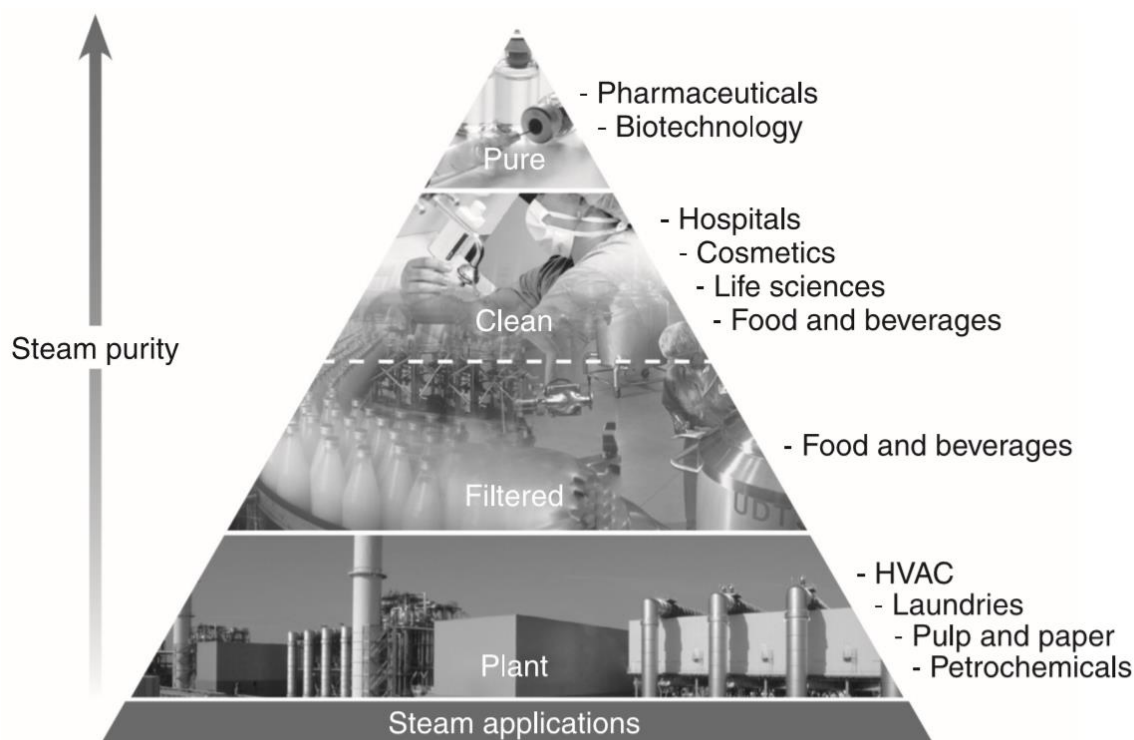
اگر می‌خواهید بدانید سیستم کاملی که می‌تواند تک تک خواسته‌های درخواستی را برآورده کند چیست، باید خروجی و قابلیت‌های سیستم را در نظر بگیرید. اگرچه ژنراتورهای بخار سریع هستند، ولی ظرفیت آنها کم است. بنابراین، یکی از مزایای دیگ بخار می‌تواند این واقعیت باشد که آنها می‌توانند انتظارات شما را از طریق خواسته‌های مختلف برآورده کنند. آنها به اندازه کافی بادوام و مستحکم هستند که در طول سالیان متمادی کار نمایند. تنها کاری که باید انجام بدهیم این است که یک متخصص برای نگهداری سالانه آن داشته باشیم [5].

مهم‌ترین عوامل در انتخاب دیگ بخار صنایع غذایی

ظرفیت دیگ بخار در انواع صنایع غذایی متفاوت می‌باشد و باید برحسب صنعتی که در آن هستید یک دیگ بخار با ظرفیت موردنیاز صنعت خود خریداری کنید. به طوری که اگر در انتخاب ظرفیت آن دقت نداشته باشید باعث کاهش کیفیت تولید می‌شود. عامل بعدی در انتخاب و کاربرد دیگ بخار در صنایع غذایی مختلف، سوخت دیگ بخار می‌باشد، که توسط خریدار تعیین می‌گردد بهترین سوخت برای دیگ بخار سوخت گاز می‌باشد. به دلیل اینکه آلاینده‌گی سوخت گازی بسیار کمتر از سوخت‌های دیگر می‌باشد. دیگ بخار صنایع غذایی باید دارای بالاترین کیفیت و راندمان باشد تا بتوان در پروسه تولید از آن استفاده نمود.

کیفیت و خلوص بخار

کیفیت و خلوص بخار یک معیار کمی از آلودگی بخار ناشی از مواد جامد محلول، مواد فرار یا سایر ذرات در بخار است که ممکن است پس از جداسازی اولیه در دیگ بخار در بخار باقی بماند [21]. در شکل (۴) کیفیت مورد انتظار از بخار آب را در صنایع مختلف مشاهده می‌نماییم به این صورت که صنایع بیوتکنولوژیکی نیازمند بالاترین کیفیت و خلوص، و صنایع نیروگاهی کمترین کیفیت و خلوص را نیاز دارند. و صنایع غذایی در این بین قرار دارند.



شکل ۴ کیفیت و خلوص مورد نیاز بخار آب در صنایع مختلف [21]

نکات فنی در خصوص استفاده دستگاه دیگ بخار در صنایع غذایی

صنایع غذایی یکی از صنایع اصلی و حیاتی ما می‌باشد و همچنین صنعت بزرگی است که با حوزه‌های مختلف ارتباط دارد و معیشت مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد، با صناعی همچون کشاورزی، تولید مواد غذایی، صنایع گردشگری و غیره، مرتبط است. شاید بتوان گفت تولید محصولات غذایی با استفاده از سوخت فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار، زحمت زیادی نداشته باشد. در فرایندهای بهداشتی که با تولید بخار انجام می‌شود مثل تولید نوشیدنی‌ها و کارخانه سس و غیره می‌توان با انتخاب تجهیزات بهینه و کم مصرف، آلودگی زیست‌محیطی را به حداقل خود رساند؛ بنابراین، راه‌حل نهایی مشکل آلودگی هوا قرار دادن دستگاه بویلر صنعتی‌ای است که نتیجه آن صرفه‌جویی در انرژی و بهینه‌سازی مصرف گاز و زغال‌سنگ باشد. بویلرهای صنعتی و دیگ‌های بخار از جمله این دستگاه‌های سازگار با محیط هستند و بسیار مورد تأیید مهندسان قرار گرفته و به استفاده از آن توصیه می‌شود. انتخاب ابعاد و وزن بویلر صنعتی بسته به خروجی بخار در نظر گرفته شده و باید بسته به مقدار نیاز بخار و حرارت در واحد زمان طراحی و استفاده شود. به‌طور معمول، حداکثر مقدار مصرفی در خط تولید باید به‌منظور برآورده نمودن میزان تقاضای مصرفی تولید در نظر گرفته شود و ابعاد بویلر صنعتی با آن انتخاب شود [1].

فرایندهایی که بخار در آن‌ها کاربرد دارد

استریل کردن و ضدعفونی کردن

ایمنی مواد غذایی همیشه جزو اولویتهای اصلی شرکت‌های فرآوری مواد غذایی می‌باشد. برای اطمینان از ایمن بودن غذاها و نوشیدنی‌های تولید شده برای مصارف عمومی، برای کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی ضروری است که تمام ابزارها، ظروف و سطوح مورد استفاده در تولید مواد غذایی را تمیز، استریل و ضدعفونی نمایند. ایمنی با همه‌گیری ویروس کرونا بسیار مهم‌تر شده است زیرا پردازنده‌های مواد غذایی اکنون باید پروتکل‌های اضافی را برای ایمن نگه داشتن کارگران کارخانه و محصولات خروجی خود انجام دهند. این با اتاق عمل بیمارستان که در آن همه ابزارهای جراحی نیاز به استریل کردن قبل و بعد از عمل دارند، تفاوت چندانی ندارد. تمام ظروف و سطوح باید قبل از تهیه غذا از هرگونه میکروب یا باکتری پاک شود. بخار حاصل از دیگ‌های بخار معمولاً بهترین و ایمن‌ترین گزینه برای استریل کردن و ضدعفونی کردن ظروف و سطوح برای مطابقت با مجموعه دستورالعمل‌ها و مراکز کنترل و پیشگیری از بیماری‌ها است [7].

کاهش خطرات میکروبیولوژیکی

آلودگی سطحی تنها نگرانی در مورد ایمنی مواد غذایی نیست. همچنین خطرات ذاتی آلودگی میکروبیولوژیکی روی یا درون خود غذاها وجود دارند، باکتری‌ها و میکروب‌هایی که باعث بیماری‌های ناشی از غذا می‌شوند. پاستوریزاسیون با بخار روشی موثر برای کنترل خطرات میکروبی فرآوری مواد غذایی است. وجود بخار با کیفیت از دیگ‌های صنعتی، انجام این فرآیند را بسیار آسان می‌کند [7].

پخت و پز و خشک کردن

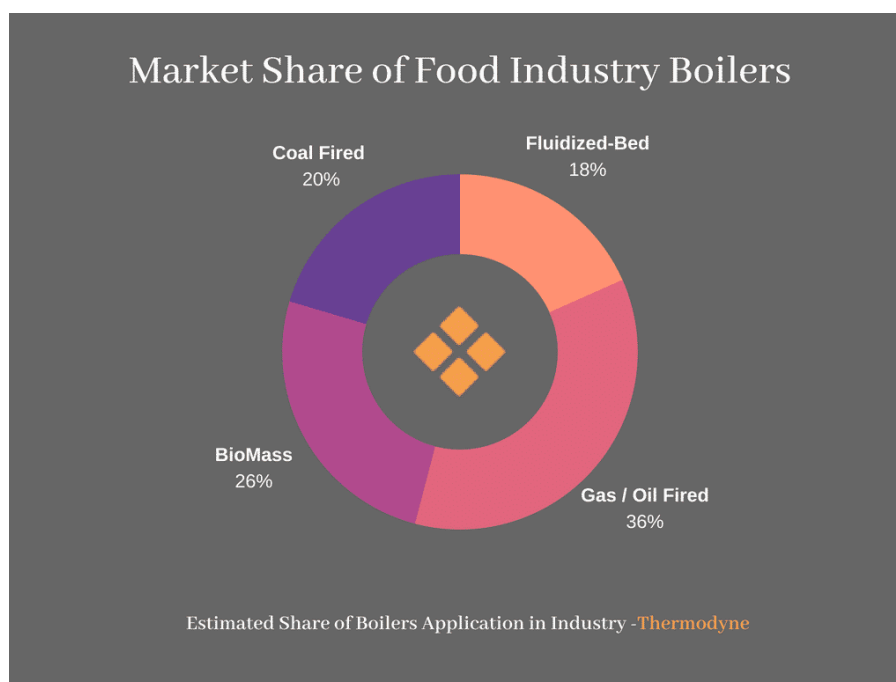
برخی از شرکت‌های فرآوری مواد غذایی قبل از اینکه غذایشان برای عموم مردم آماده شود، پخت و پز زیادی انجام می‌دهند. در حالی که روش‌های زیادی برای طبخ یا پیش‌پز کردن غذا وجود دارد، انجام این کار با بخار و آب داغ تولید شده توسط دیگ‌ها، یکی از بهترین راه‌ها برای اطمینان از تمیز، نرم بودن و هضم آسان غذا پس از رسیدن به دست مصرف‌کنندگان است. فرایندهای پیچیده‌تر مانند پخت و خشک کردن برخی از محصولات غذایی نیز به بخار نیاز دارند. از آنجایی که فرآوری مواد غذایی معمولاً یک عملیات در مقیاس بزرگ است، حجم زیادی از بخار و آب گرم حداقل در برخی مواقع مورد نیاز است [7].

گرمایش تاسیسات

شرکت‌های فرآوری مواد غذایی نه تنها به ماشین آلات کارآمد بلکه به سخت کوشی کارکنان خود نیز متکی هستند. کنترل آب و هوا در این کارخانه‌ها برای به حداکثر رساندن بهره‌وری و حفظ ایمنی کارگران ضروری است. بنابراین، در بسیاری از موارد، همان سیستم دیگ بخار که به مراحل مختلف تولید غذا کمک می‌کند، گرمای خود کارخانه را نیز تامین می‌کند [7].

سوخت مورد استفاده در دیگ‌های بخار مواد غذایی

گرمای قلب فرآیندهای غذایی صنعتی است. صنایع غذایی در هر مرحله از فرآیند به گرما نیاز دارند. گرمای مستقیم یا گرمای حاصل از آب گرم یکی از فاکتورهای اساسی در صنعت فرآوری مواد غذایی است. این دیگ‌های بخار صنایع غذایی معمولاً از سوخت‌های فسیلی برای تولید گرما و آب گرم برای نظافت و پخت و پز استفاده می‌کنند [8]. شکل (۵) مقدار استفاده از انواع سوخت‌ها در بویلرهای صنایع غذایی جهان را نمایش می‌دهد که عبارت‌اند از: زغال سنگ، گاز طبیعی، نفت سیاه و زیست توده



شکل ۵ مقدار استفاده از انواع سوخت‌ها در بویلرهای صنایع غذایی جهان [8]

اجزاء مختلف سازنده یک بویلر

بویلرها بخشی از سیستم گرمایش هیدرونیک هستند. سیستم‌های هیدرونیک از آب برای انتقال گرما به منبع توزیع مانند رادیاتور برای گرم کردن خانه استفاده می‌کنند. سیستم‌های هیدرونیک بسته به نوع دیگ مورد استفاده می‌توانند از طریق آب گرم یا بخار گرم شوند. دیگ بخار بخشی از سیستم است که آب توزیع شده را گرم می‌کند. عناصر کلیدی یک دیگ شامل مشعل، محفظه احتراق، مبدل حرارتی، دودکش و سیستم کنترل، می‌باشد. لوازم جانبی بویلر از جمله اکونومایزر گاز دودکش نیز معمولاً به عنوان روشی مؤثر برای بازیابی گرما از دیگ بخار استفاده می‌شود.

مشعل (Burner)

مشعل جزء اصلی دیگ بخار است که گرمای آن، آب سیستم را گرم می‌کند. سوخت مورد استفاده می‌تواند گاز طبیعی یا نفت یا ... باشد.

مبدل حرارتی (Heat exchanger)

مبدل حرارتی دیگ بخار به گرمای مشعل اجازه می‌دهد تا آب موجود در سیستم را گرم کند. وظیفه مبدل حرارتی انتقال حرارت از مشعل به آب بدون تماس مستقیم با آب است. این ایده شبیه به جوشاندن آب در لوله بدون تماس با شعله است.

خطوط تامین (Supply lines)

سیستم‌های گرمایش هیدرونیک از لوله‌کشی برای رساندن آب گرم یا بخار به نقاط توزیع استفاده می‌کنند و خطوط تامین لوله‌هایی هستند که آب گرم یا بخار را به توزیع کننده می‌رسانند.

خطوط برگشت (Return lines)

هنگامی که بخار یا آب سرد می‌شود و بخار به آب تغییر حالت می‌دهد، خطوط برگشت این آب را برای گرم کردن مجدد به دیگ برمی‌گردانند.

محفظة احتراق (Firebox)

محفظة احتراق جایی است که سوخت سیستم با هوا برخورد می‌کند و شعله ایجاد می‌شود.

عایق نسوز (Refractory)

عایق نسوز در واقع به مواد نسوز اطلاق می‌شود که برای پر کردن هر شکاف و یا منافذی که ممکن است در اطراف محفظه احتراق باشد استفاده می‌شود، این کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود که آتش در محفظه احتراق باقی می‌ماند.

پمپ‌های سیرکولاتور (Circulator pumps)

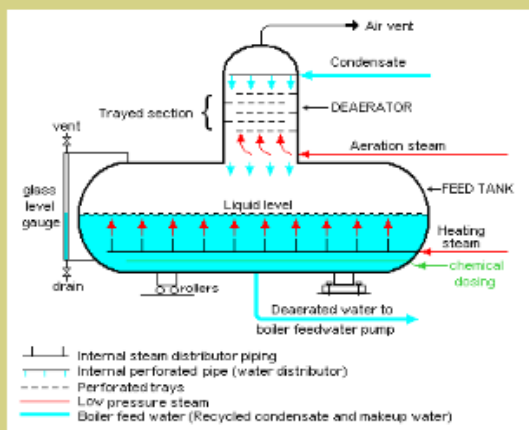
پمپ‌های سیرکولاتور آب گرم یا بخار را از سیستم به محل موردنیاز ما انتقال می‌دهند. یعنی فشار موردنیاز برای این انتقال را تامین می‌کنند.

هواگیر / کندانسور (Deaerators/Condenser)

مخازن هواگیر و کندانسور فقط در سیستم‌های دیگ بخار استفاده می‌شود و در آب داغ و روغن داغ استفاده نمی‌شود زیرا در اینجا سیال همیشه به صورت مایع است. روش ساخت این دو نوع مخزن تقریباً یکسان است، اما همانطور که از نام آنها پیداست برای مصارف مختلفی استفاده می‌شود [9]. در شکل (۶) نحوه کار هواگیر و کندانسور را مشاهده می‌کنیم.

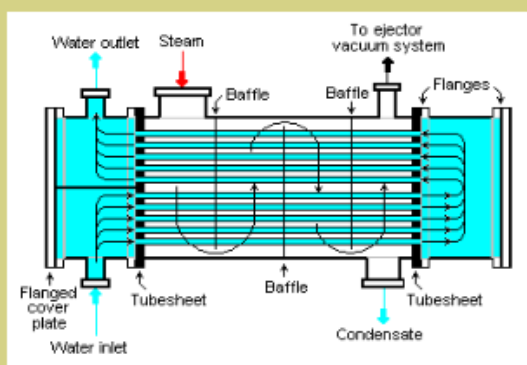
اکونومایزر (Economizer)

از لحاظ تاریخی، اکونومایزرها فقط در نیروگاه‌های بزرگ مقیاس استفاده می‌شده‌اند. با این حال، تقاضا برای بویلرهای کارآمدتر در صنعت به این معنی است که اکونومایزرها در حال حاضر بسیار رایج تر هستند. اکونومایزر یک مبدل حرارتی است که در اگزوز دیگ بخار قرار می‌گیرد. بسته به محل نصب اکونومایزر، نیازهای پمپ بسیار متفاوت است. اکونومایزرها، دستگاه‌های مکانیکی هستند که برای کاهش مصرف انرژی یا انجام عملکرد مفیدتر مانند پیش گرم کردن مایعات در نظر گرفته می‌شوند [9].



Deaerator :-

A deaerator is used to reduce oxygen (O_2) and carbonic acid (CO_2) levels in boiler feed water to protect a boiler against corrosion. It is possible to reduce oxygen and carbonic acid levels to about $< 0.02 \text{ mg/l}$ of O_2 and 0 mg/l of CO_2 , depending on deaerator construction.



Condenser :-

A condenser ensures that all steam is condensed before being pumped back into the deaerator and on into the boiler. New treated water is normally fed into the condenser.

شکل ۶ نحوه کار هواگیر و کندانسور [9]

مباحث مدلسازی قابلیت اطمینان سیستم‌های بخار

بخش اول: بررسی دو مقاله جامع و کامل در زمینه قابلیت اطمینان بویلرها و روش‌شناسی آنها

مقاله اول

این مطالعه در کشور هند توسط سویوگ پاتیل (suyog patil) و همکاران در سال ۲۰۲۱ مورد پژوهش قرار گرفته است که به بررسی قابلیت اطمینان بویلرها پرداخته است [10].

توضیحات مقاله اول

در این مطالعه بیان شده است که، تقاضای بخار در صنایع فرآیندی به سرعت در حال افزایش می‌باشد و این تقاضا با افزایش ظرفیت استفاده از دیگ‌های بخار تامین می‌شود. بسیاری از صنایع فرآیندی به دیگ‌های بخار صنعتی به عنوان یک جزء حیاتی برای عملکرد خود وابسته هستند. در دسترس بودن دیگ را می‌توان با شناسایی زیرسیستم‌ها و قطعات مکانیکی حیاتی مربوط به فرکانس خرابی، قابلیت اطمینان و نگهداری و به حداقل رساندن احتمال وقوع آنها بهبود بخشید. انتخاب تکنیک مناسب برای جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و

تحلیل پایایی ضروری است. زمان بین خرابی (TBF^1) و زمان تعمیر (TTR^2) همه اجزا و زیرسیستم‌ها برای انجام تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن و نگهداری (RAM^3) جمع‌آوری شده است. بهترین پارامترهای توزیع با استفاده از نرم افزار WEIBULL++10 RELIASOFT پس از انجام تست، محاسبه شده است. همچنین، فواصل نگهداری پیشگیرانه⁴ تمامی اجزا و زیرسیستم‌ها و در دسترس بودن سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل این اطلاعات نشان می‌دهد که سیستم احتراق، سیستم تغذیه آب و سیستم دمش⁵، سیستم‌های حیاتی از منظر قابلیت اطمینان هستند و هنوز هم بزرگترین دلایل برای خرابی دیگ‌های بخار می‌باشند. مطالعه تحقیقاتی همچنین نشان داد که زمان تعمیر برای سیستم احتراق طولانی‌تر از سایر زیرسیستم‌ها است و بنابراین، برای افزایش در دسترس بودن آن، پیشنهاد شده است که منابع تعمیر و نگهداری در لحظه مناسب به سیستم احتراق تخصیص داده شود. این مطالعه همچنین استفاده از آنالیز RAM را در تصمیم‌گیری فواصل نگهداری پیشگیرانه اجزاء و زیر سیستم‌های دیگ نشان می‌دهد. همچنین این مطالعه مرجعی برای تهیه طرح تعمیر و نگهداری سیستم دیگ بخار ارائه می‌دهد [10].

استفاده از اتوماسیون در سیستم‌ها، فناوری مدرن، رابط‌های نرم‌افزار-سخت‌افزار و وظایف بین رشته‌ای، اکنون فرآیندهای مهندسی را پیچیده‌تر می‌کند. امروزه توسعه محصولات جدید با افزایش نیازهای عملیاتی، افزایش پیچیدگی و کاهش هزینه‌های محصول و توسعه، مواجه می‌باشد. یکپارچگی ویژگی‌های سیستم و اجزای آن شامل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت نگهداری و ایمنی ($RAMS^6$) می‌باشد [10].

قابلیت اطمینان را می‌توان به عنوان احتمالی در نظر گرفت که سیستم و تجهیزات مرتبط با آن عملکردهای خود را به طور موثر برای یک دوره زمانی مشخص و با حداقل خطر خرابی در سیستم انجام دهند. طراحی قابلیت اطمینان نیاز به ارزیابی اثرات خرابی بر روی سیستم و تجهیزات آن دارد. در دسترس بودن تجهیزات این جنبه از قابلیت اطمینان سیستم را در نظر می‌گیرد. تأثیر خطاها یا نیازهای ضروری سیستم برای بازگرداندن عملکرد آنها به انتظارات طراحی به عنوان در دسترس بودن ارزیابی می‌شود. قابلیت نگهداری، جنبه نگهداری است که زمان خرابی سیستم را در نظر می‌گیرد. قابلیت نگهداری ممکن است توانایی تجهیزات برای بازیابی تحت شرایط مشخص باشد. در حوزه بازارهای رقابتی و اقتصاد در حال تغییر، فشار شدیدی برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان و تولید محصولات با کیفیت بالا و به موقع برای صنایع تولیدی و خدماتی وجود دارد. قابلیت اطمینان سیستم باید برای مشتری که قابلیت اطمینان را به عنوان یک موضوع مهم در طول چرخه توسعه محصول در نظر می‌گیرد، ارزیابی شود [10].

¹ Time between failure

² Time to repair

³ Reliability, availability, and maintainability

⁴ Preventive maintenance intervals

⁵ blow-down system

⁶ Reliability, availability, maintainability, and safety

صنایع فرآیندی، صنایعی هستند که یا در فرآیند تولید اولیه مستمر و پیوسته هستند یا به صورت ناپیوسته هستند. در هر گوشه‌ای در سراسر جهان، صنایع فرآیندی وجود دارند و نقش مهمی در اقتصاد کشورها دارند که نمونه‌های صنایع فرآیندی شامل مواد غذایی، نوشیدنی‌ها، مواد شیمیایی، نفت، فلزات اساسی، زغال سنگ، لاستیک، منسوجات، محصولات چوبی، کاغذ یا محصولات کاغذی و غیره می‌باشد. صنایع فرآیندی یکی از بخش‌های حیاتی هستند که از نیروی بخار استفاده می‌کنند. آب بخار شده اغلب با استفاده از دیگ‌های آب تحت شرایط کنترل شده در شرایط صنعتی تولید می‌شود. بسیاری از صنایع فرآیندی به عنوان یک عنصر مهم در عملیات خود به دیگ‌های بخار صنعتی وابسته هستند. سیستم دیگ بخار از زیرسیستم‌های زیادی تشکیل شده است، بنابراین ساختار پیچیده‌ای دارد و به همین دلیل خرابی‌های زیادی دارد زیرا همان‌طور که می‌دانیم سیستم‌هایی که قطعات بیشتری دارند، دارای احتمال وقوع خرابی بالاتری نیز می‌باشند [10].

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان به درک زیرسیستم‌ها و اجزای با قابلیت اطمینان کم و نگهداری آنها کمک می‌کند. در نتیجه، قابلیت اطمینان، نگهداری و بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر محصول به تمرکز اصلی در این مطالعه تبدیل شده است. بیشتر مطالعات قابلیت اطمینان بر روی لوله‌های دیگ، پمپ‌ها و موتورهای تغذیه آب، خرابی شعله احتراق و سیستم‌های تغذیه سوخت متمرکز شده‌اند و اکثر کارهای تحقیقاتی به چند جزء انتخابی محدود می‌شوند. با بهبود قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و اجزاء، در دسترس بودن سیستم دیگ بخار را می‌توان افزایش داد. بنابراین تصمیم گرفته شده است که در این مطالعه تحقیقات دقیقی در مورد تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری دیگ‌های بخار انجام شود [10].

روش تحقیق و پژوهش در این مقاله

Vaurio و Ascher و Feingold [11] روش خاصی را بر اساس آزمایش‌های مختلف برای انتخاب مدل‌ها برای داده‌های زمان تا شکست (TTF) و زمان تعمیر (TTR) به طور مناسب توسعه دادند. این روش شامل آزمایش‌هایی برای انتخاب یک مدل است، اما برای استفاده بیشتر توسط تحلیلگران تعمیر و نگهداری ساده شده است. بر این اساس، یک چارچوب اصلاح شده در شکل (۷) پیشنهاد شده است که شامل چندین معیار برای انتخاب مدل‌ها می‌باشد. در روش انتخاب مدل، چارچوب ارائه شده در شکل (۷) برای کاربردهای صنعتی، کامل و آسان‌تر می‌باشد. این یک چارچوب را نشان می‌دهد که در اینجا برای شناسایی و تجزیه و تحلیل خطاها استفاده شده است. در ابتدا، یک سیستم باید به سطوح مختلف از جمله زیرمجموعه و اجزا تقسیم شود. پس از آن، داده‌های خرابی میدانی باید از منابع مختلفی مانند دفاتر سابقه تعمیر و نگهداری، متخصصان تعمیر و نگهداری و تست قابلیت اطمینان، جمع‌آوری شوند. آزمایش عمر تسریع شده^۷ برای تولید داده‌های کافی استفاده می‌شود، یا گاهی اوقات می‌توان از داده‌های خرابی میدانی نیز برای تجزیه و تحلیل استفاده کرد. زمانی که داده‌های کافی در دسترس نباشد، ممکن است از روش بیزی^۸ استفاده شود. اگر اطلاعات کافی در

⁷ Accelerated life testing

⁸ Bayesian method

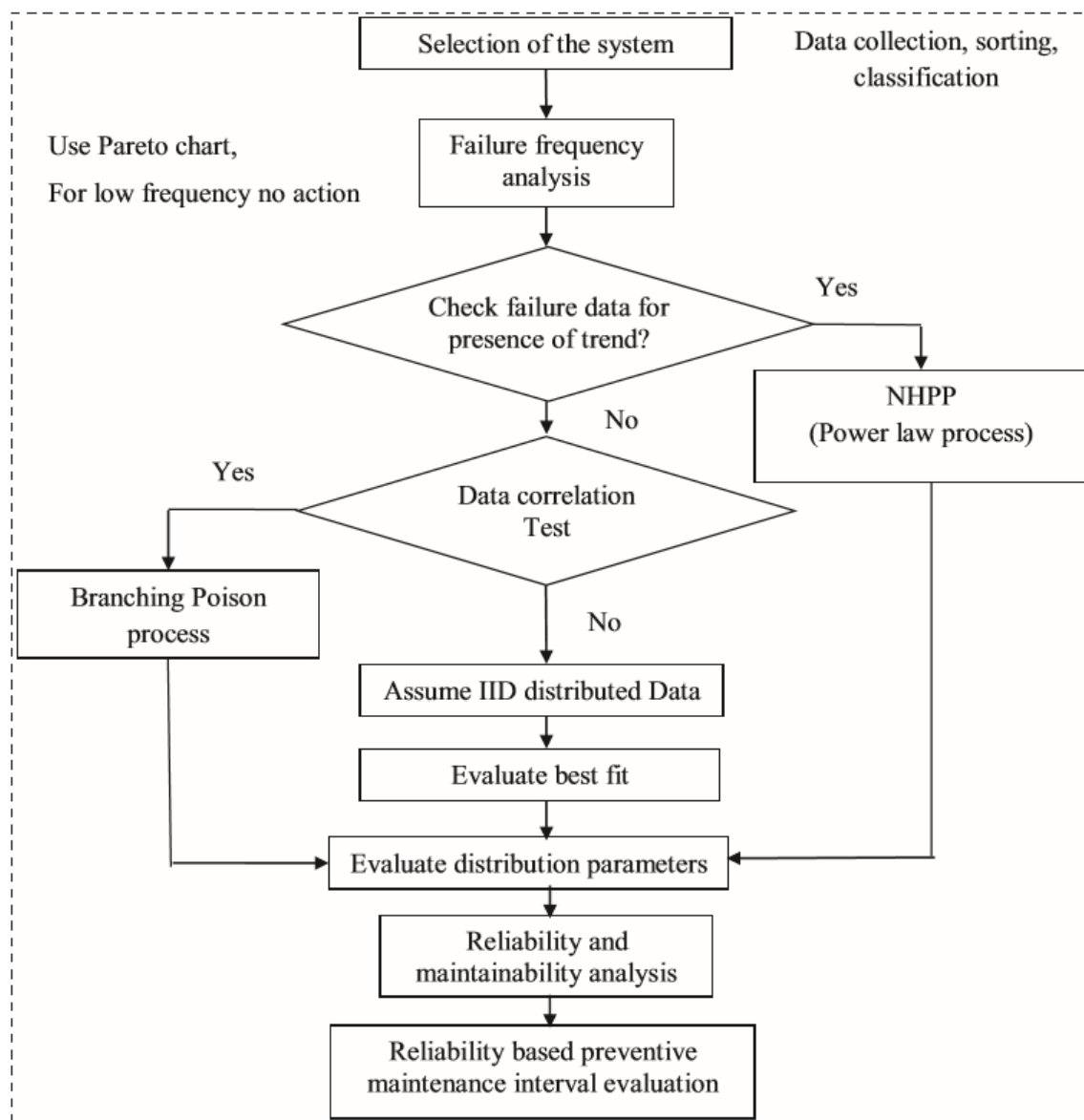
دسترس باشد، می‌توان آن را به صورت پارامتریک یا غیرپارامتریک تحلیل کرد. سپس از نمودار پارتو^۹ برای شناسایی اجزای حیاتی سیستم استفاده می‌شود، و در نهایت، برخی تکنیک‌های گرافیکی و تحلیلی برای ارزیابی روند داده‌های خرابی استفاده می‌شوند. پس از آن بیشترین توزیع احتمال را شناسایی می‌شود و در نهایت پارامترهای بهترین توزیع و پارامترهای قابلیت اطمینان را می‌توان تخمین زد. برای ارزیابی روند داده‌ها و تأیید خوب بودن تناسب داده‌ها، باید تعداد زیادی آزمایش انجام شود. بنابراین، چارچوب باید ساده و منعطف باشد، به طوری که بتوان از آن برای تجزیه و تحلیل سیستم‌ها، با دقت استفاده کرد و مدت زمان تجزیه و تحلیل را کاهش داد [10].

انجام فرآیندهای بسیاری از صنایع به دیگ‌های بخار مکانیکی به عنوان بخشی تاثیرگذار، وابسته هستند. دیگ بخار از زیرسیستم‌ها و اجزای بسیاری با ساختارهای پیچیده تشکیل شده است. اگر هر جزء یا زیرسیستم از کار بیفتد، ممکن است احتمال خرابی کل سیستم وجود داشته باشد. در این مطالعه، کل سیستم به ۹ زیرسیستم مجزا، همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است، تقسیم شده است. تعداد زیادی بخش در هر زیرسیستم وجود دارد. ارزیابی بیشتر در ادامه در نظر می‌گیرد که اطلاعات خرابی و تعمیر کافی برای عناصر مهم از هر زیرسیستم وجود دارد یا خیر [10].

جدول ۱ زیرسیستم‌های در نظر گرفته شده برای یک بویلر و سیستم بخار [11]

| Sr. no. | Boiler subsystems | Code | Sr. no. | Boiler subsystems | Code |
|---------|--------------------------------|------|---------|--------------------------|------|
| 1 | Combustion and ignition system | CIS | 6 | Steam circulation system | SCS |
| 2 | Feed water supply system | FWS | 7 | Control system | CS |
| 3 | Blow-down system | BDS | 8 | Electrical system | ES |
| 4 | Emission control system | ECS | 9 | Other systems | OS |
| 5 | Fuel-supply system | FSS | | | |

⁹ Pareto chart

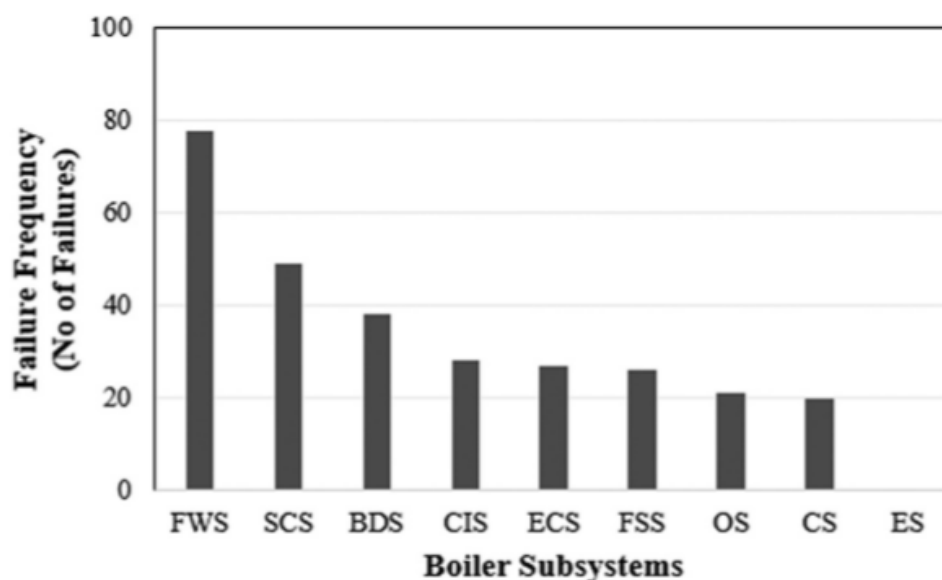


شکل ۷ روش انتخاب مدل زمان تا شکست (TTF) [10]

نحوه جمع‌آوری داده‌ها در این مقاله

برای تجزیه و تحلیل، داده‌های TTF و TTR را می‌توان از برگه‌های تعمیر و نگهداری صنعتی و با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر قضاوت متخصصان جمع‌آوری کرد. اگر داده‌های کافی در دسترس باشد، نتایج تجزیه و تحلیل دقیق‌تری نیز بدست می‌آید. با توجه به کمبود داده‌های ثبت شده و دقیق، اشاره شده است که پرسنل تعمیر و نگهداری از دانش کافی در مورد ماشین‌آلات و عیوب برخوردار هستند و می‌توانند در ارائه داده‌ها کمک نمایند، بنابراین ایده اصلی جمع‌آوری داده از طریق قضاوت کارشناسی، با استفاده از دانش و تجربه پرسنل تعمیر و نگهداری می‌باشد. برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم دیگ بخار، داده‌های TTF و TTR با استفاده از دانش و تجربه پرسنل تعمیر و نگهداری است. برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم

دیگ بخار، داده‌های TTF و TTR از کارشناسان مختلف صنعتی جمع‌آوری شده است. پرسشنامه‌هایی شامل زمان تقریبی بین شکست (TBF) و زمان مورد نیاز برای تعمیر (TTR) تهیه شده است. اطلاعات TTF و TTR از طریق این پرسشنامه‌ها جمع‌آوری می‌شوند. تحلیل فرکانس خرابی بر روی زیرسیستم‌های دیگ با استفاده از اصل نمودار پارتو برای شناسایی زیرسیستم‌های بحرانی انجام شده است و در شکل (۸) نشان داده شده است. تعداد خرابی سیستم تامین آب¹⁰ FWS نزدیک به ۷۸ مورد است (که تقریباً ۲۷.۱۸٪ از کل خرابی‌ها را شامل می‌شود)، برای سیستم گردش بخار¹¹ SCS تقریباً ۱۷.۰۸٪ و برای سیستم دمش¹² BDS تقریباً ۱۳.۲۴٪ از کل خرابی‌ها را شامل می‌شود. میزان خرابی این زیرسیستم‌های فوق‌الذکر نسبتاً بالاتر از سایر زیرسیستم‌ها گزارش شده است [10].



شکل ۸ تجزیه و تحلیل فراوانی خرابی زیرسیستم‌های دیگ بخار [10]

تست روند (Trend test)

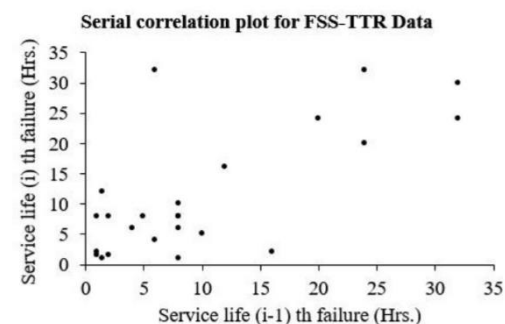
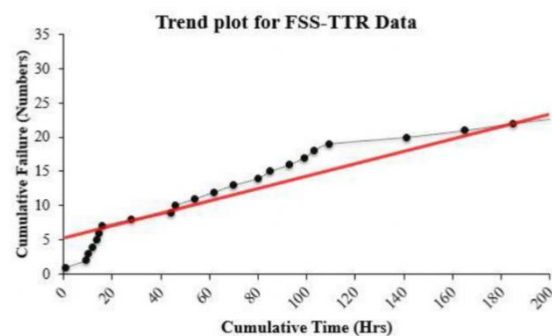
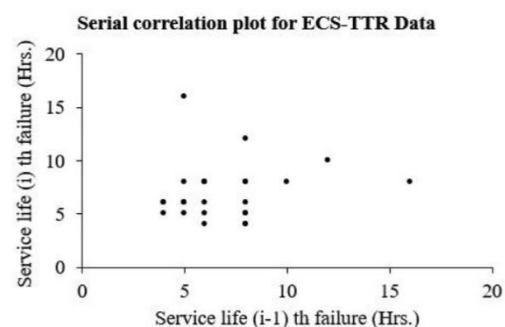
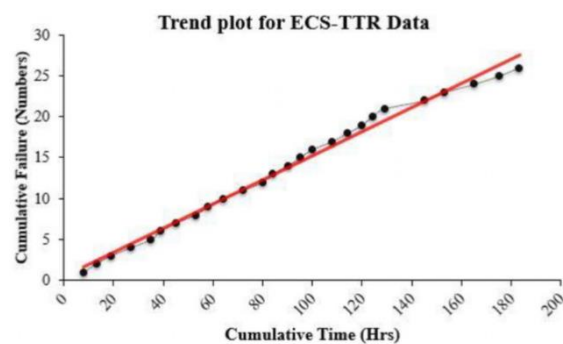
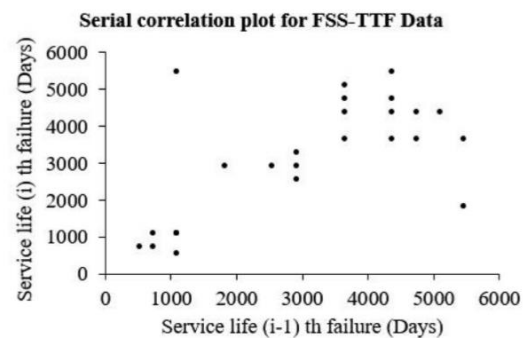
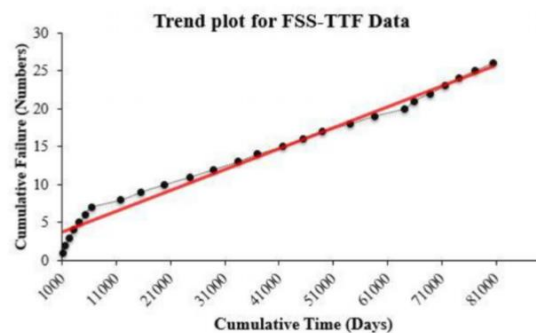
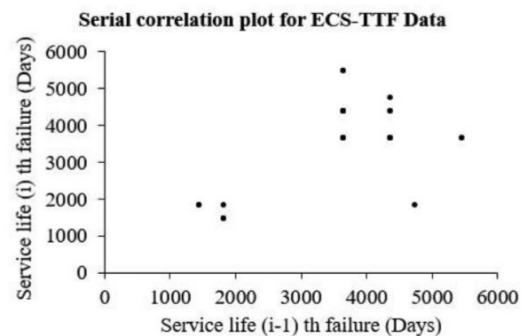
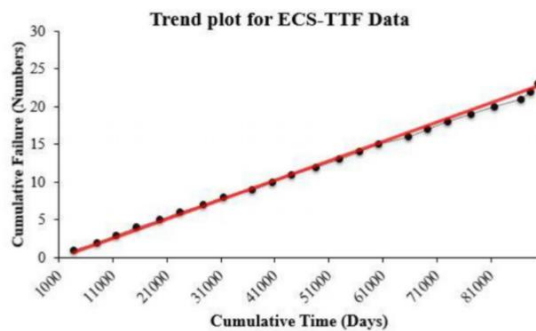
وجود روند در داده‌های خرابی باید قبل از انتخاب مدل تحلیل شکست بررسی شود. برای آزمایش روند داده‌ها، می‌توان از تکنیک‌های گرافیکی و تحلیلی مختلفی استفاده کرد. آزمایش روند به صورت گرافیکی با ترسیم شکست تجمعی در مقابل زمان و همبستگی توسط نمودارهای پراکندگی در برابر داده‌های TTF و TTR انجام می‌شود. هنگامی که آزمایش روند برای داده‌های TTF انجام می‌شود اگر منحنی رو به بالا مقعر باشد، نشان می‌دهد که عملکرد سیستم در طول زمان کاهش می‌یابد، در حالی که منحنی رو به پایین مقعر، نشان می‌دهد که سیستم در طول زمان بهبود می‌یابد. هنگامی که منحنی تقریباً یک خط مستقیم است، داده‌ها را می‌توان

¹⁰ Feed water supply system

¹¹ Steam circulation system

¹² Blow-down system

به صورت یکسان توزیع شده و بدون روند در نظر گرفت. با ثبت اطلاعات شکست (i) در مقابل شکست قبلی (i-1)، آزمون همبستگی سری انجام می‌شود و در صورت مشاهده نقاط داده پراکنده، داده‌ها مستقل و عاری از هر گونه همبستگی هستند. از طرف دیگر، زمانی که یک خط مستقیم مشاهده می‌شود وابسته یا همبسته هستند [12]، [13]، [14] و [15]. آزمایش روند برای داده‌های خرابی توسط شکست تجمعی در مقابل نمودار زمانی و نمودار پراکندگی سیستم دیگر بخار در سطوح زیرسیستم مختلف انجام می‌شود. نتایج آزمون روند برای داده‌های خرابی ECS و FSS در شکل (۹) نشان داده شده است. از شکل (۹) سمت راست مشاهده می‌شود که داده‌های TTF و TTR تقریباً یک خط مستقیم را دنبال می‌کنند و شکل (۹) سمت چپ نقاط پراکنده را نشان می‌دهد. بنابراین، داده‌های ECS و FSS، TTF و TTR از هیچ روند یا همبستگی پیروی نمی‌کنند و بنابراین داده‌ها مستقل و به طور یکسان توزیع شده‌اند. به طور مشابه، سایر آزمون‌های روند زیرسیستم‌ها انجام می‌شوند و مشاهده می‌شود که داده‌ها بدون روند هستند [10].



شکل ۹ سمت چپ: نمودارهای تست روند برای ECS و FSS، سمت راست: نمودارهای تست همبستگی سریال برای ECS و FSS [10]

تست مناسب بودن برازش داده‌ها^{۱۳}

از بخش قبلی مشاهده می‌شود که داده‌ها بدون روند هستند، و در ادامه، ارزیابی خوب بودن برازش داده‌ها انجام می‌شود. تست خوب بودن برازش با آزمون کولموگروف اسمیرنوف (K-S) ارزیابی می‌شود و بهترین توزیع

^{۱۳} Goodness of Fit Test

برازش برای زیرسیستم‌های مورد بررسی شناسایی می‌شود. نتایج خوبی برازش برای سیستم دیگ بخار در سطح زیرسیستم و جزء به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. از این تجزیه و تحلیل، مشخص می‌شود که بهترین توزیع برای اکثر اجزای سیستم بویلر Weibull 3P می‌باشد [10].

جدول ۲ بهترین نتایج توزیع سطح زیرسیستم‌های دیگ بخار [10]

| Subsystem | | CIS | FWS | BDS | ECS | FSS | SCS | CS | OS |
|-------------------|-------------------------|---|--|--|--------------------------------------|---|---|--------------------------------------|---|
| TBF data analysis | Best-fit distribution | W. 3P | W. 3P | W. 3P | N | N | N | N | LN |
| | Distribution parameters | $\beta = 1.569$, $\theta = 1402$, $\gamma = 2762$ | $\beta = 1.913$, $\theta = 3816$, $\gamma = 418.9$ | $\beta = 0.885$, $\theta = 2788$, $\gamma = 37.00$ | $\mu = 3582$, $\sigma = 1115$ | $\mu = 3095$, $\sigma = 1621$ | $\mu = 3754.3$, $\sigma = 961.85$ | $\mu = 3060$, $\sigma = 1879$ | $\mu' = 8.42$, $\sigma' = 0.12$ |
| TTR data analysis | Best-fit distribution | W. 3P | W. 3P | W. 3P | LN | W. 3P | W. 3P | LN | W. 3P |
| | Distribution parameters | $\beta = 1.57$, $\theta = 36.89$, $\gamma = 1.58$ | $\beta = 1.57$, $\theta = 36.89$, $\gamma = 1.58$ | $\beta = 0.703$, $\theta = 2.007$, $\gamma = 0.88$ | $\mu' = 1.894$, $\sigma' = 0.34$ | $\beta = 0.78$, $\theta = 9.86$, $\gamma = 0.678$ | $\beta = 0.6$, $\theta = 4.38$, $\gamma = 0.98$ | $\mu' = 0.748$, $\sigma' = 0.29$ | $\beta = 1.98$, $\theta = 1.72$, $\gamma = 1.245$ |

Note: Ex. 2P = exponential 2P, LN = log-normal, N = normal, W.2P = Weibull 2 parameter, W.3P = Weibull 3 parameter.

جدول ۳ نتایج بهترین توزیع در سطح جزء در سیستم بویلر [10]

| Sr. no. | Component | TTF data analysis | | | | | | | TTR data analysis | | | | | | |
|---------|--|----------------------------|---------|---------|--------|----------|-----------------------|---|----------------------------|---------|---------|---------|----------|-----------------------|--|
| | | K-S test (goodness-of-fit) | | | | | Best-fit distribution | Distribution parameters | K-S test (goodness-of-fit) | | | | | Best-fit distribution | Distribution parameters |
| | | Ex. 2P | LN | N | W. 2P | W. 3P | | | Ex. 2P | LN | N | W. 2P | W. 3P | | |
| 1 | Header | 0.1611 | 0.4262 | 0.4805 | 0.6218 | 0.1704 | Ex. 2P | $\mu = 836.2, \gamma = 3151.9$ | 0.0360 | 0.0552 | 0.3517 | 0.1784 | 0.00009 | W. 3P | $\beta = 0.58, \gamma = 19.66, \theta = 9.0$ |
| 2 | Hot gas tubes | 0.1611 | 0.4262 | 0.4805 | 0.6218 | 0.1704 | Ex. 2P | $\mu = 836.2, \gamma = 3151.9$ | 0.0247 | 0.00020 | 0.0088 | 0.0169 | 0.0000 | W. 3P | $\beta = 0.93, \gamma = 22.11, \theta = 13.74$ |
| 3 | Furnace/shell | 0.0000 | 0.0000 | 0.0033 | 0.1193 | 0.0000 | W. 3P | $\beta = 1.46, \gamma = 2529, \theta = 1904$ | 0.0666 | 0.1881 | 0.2243 | 0.3670 | 0.0186 | W. 3P | $\beta = 0.49, \gamma = 47.63, \theta = 5.10$ |
| 4 | Intake vent/air vent | 0.0737 | 0.0000 | 0.0034 | 0.0365 | 0.0000 | LN | $\mu = 8.267, \sigma = 0.223$ | 0.9221 | 0.7208 | 0.3933 | 0.5371 | — | N | $\mu = 8, \sigma = 3.04$ |
| 5 | Water tubes | 0.1948 | 0.0147 | 0.05889 | 0.1251 | 0.001437 | W. 3P | $\beta = 1.46, \gamma = 3231, \theta = 1477$ | 0.1041 | 0.0312 | 0.0175 | 0.0493 | 0.0145 | W. 3P | $\beta = 0.82, \gamma = 0.35, \theta = 12.62$ |
| 7 | Back flow pre-venter valve | 0.6635 | 0.4484 | 0.4687 | 0.2982 | — | W. 2P | $\beta = 4.34, \theta = 3516,$ | 0.7530 | 0.1255 | 0.1054 | 0.1844 | 0.0135 | W. 3P | $\beta = 2.67, \gamma = 0.04, \theta = 1.68$ |
| 9 | Feed water pump-gauge | 0.0242 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | W. 2P | $\beta = 4.34, \theta = 3516,$ | 0.7530 | 0.1255 | 0.1054 | 0.1844 | 0.0135 | W. 3P | $\beta = 2.67, \gamma = 0.04, \theta = 1.68$ |
| 10 | Softnar | 0.7521 | 0.5398 | 0.5398 | 0.5854 | 0.2505 | W. 3P | $\beta = 7.3, \gamma = -33.8, \theta = 3480$ | 0.0620 | 0.00195 | 0.0162 | 0.0275 | 0.0016 | W. 3P | $\beta = 1.43, \gamma = 33.04, \theta = 14.80$ |
| 12 | Water level controller (Mobari) | 0.7012 | 0.5783 | 0.5783 | 0.5170 | 0.1785 | W. 3P | $\beta = 8.62, \gamma = 411.5, \theta = 3931$ | 0.1474 | 0.1012 | 0.1176 | 0.1117 | 0.0083 | W. 3P | $\beta = 1.65, \gamma = 4.14, \theta = 3.20$ |
| 13 | Feed check valve | 0.5338 | 0.4750 | 0.4694 | 0.5491 | — | N | $\mu = 4797.1, \sigma = 521.9$ | 0.4260 | 0.7661 | 0.7558 | 0.8529 | 0.5984 | Ex. 2P | $\mu = 0.46, \gamma = 0.796$ |
| 14 | Feed water hose | 0.0791 | 0.0249 | 0.0701 | 0.1223 | 0.0040 | W. 3P | $\beta = 1.49, \gamma = 2535, \theta = 1671$ | 0.2601 | 0.1095 | 0.0988 | 0.1404 | 0.0275 | W. 3P | $\beta = 1.70, \gamma = 5.97, \theta = 4.39$ |
| 16 | De-aerator | 0.1561 | 0.01255 | 0.0323 | 0.0902 | 0.0332 | LN | $\mu = 8.3656, \sigma = 0.120$ | 0.6506 | 0.1374 | 0.1457 | 0.2898 | 0.0134 | W. 3P | $\beta = 0.892, \gamma = 34.39, \theta = 8.49$ |
| 20 | Shut-off valve | 0.0527 | 0.01601 | 0.0538 | 0.0973 | 0.00586 | W. 3P | $\beta = 1.35, \gamma = 3295, \theta = 1215$ | 0.7521 | 0.5398 | 0.5398 | 0.5854 | 0.2505 | W. 3P | $\beta = 2.31, \gamma = 0.02, \theta = 1.66$ |
| 21 | Blow-down connections | 0.0805 | 0.0362 | 0.0368 | 0.0581 | 0.01357 | W. 3P | $\beta = 1.15, \gamma = 3377, \theta = 993$ | 0.5579 | 0.1134 | 0.0134 | 0.0106 | — | W. 2P | $\beta = 2.24, \theta = 6.86$ |
| 22 | Blow down valve | 0.4086 | 0.2389 | 0.3474 | 0.4502 | 0.1355 | W. 3P | $\beta = 1.59, \gamma = 2543, \theta = 1614$ | 0.5579 | 0.1134 | 0.0134 | 0.0106 | — | W. 2P | $\beta = 2.24, \theta = 6.86$ |
| 23 | Induced drum (ID) fan | 0.7521 | 0.5398 | 0.5398 | 0.5854 | 0.2505 | W. 3P | $\beta = 8.82, \gamma = 37.4, \theta = 4141$ | 0.1469 | 0.0289 | 0.0520 | 0.0381 | 0.0047 | W. 3P | $\beta = 2.64, \gamma = 1622, \theta = 40282$ |
| 24 | Forced draft (FD) fan | 0.1183 | 0.3622 | 0.3379 | 0.4885 | 0.2504 | Ex. 2P | $\mu = 832.9, \gamma = 3363$ | 0.1469 | 0.0289 | 0.0520 | 0.0381 | 0.0047 | W. 3P | $\beta = 2.64, \gamma = 1.80, \theta = 5.28$ |
| 25 | Secondary air (SA) fan | 0.1195 | 0.03737 | 0.0249 | 0.0574 | 0.0152 | W. 3P | $\beta = 1.52, \gamma = 3158, \theta = 1315$ | 0.1770 | 0.00446 | 0.0198 | 0.0534 | 0.002317 | W. 3P | $\beta = 1.76, \gamma = 3.28, \theta = 2.67$ |
| 27 | Rack and pinion coal feeding mechanism | 0.4584 | 0.0187 | 0.00499 | 0.0197 | 0.00677 | N | $\mu = 4502, \sigma = 634.5$ | 0.0779 | 0.0931 | 0.0683 | 0.1322 | 0.0275 | W. 3P | $\beta = 1.58, \gamma = 0.65, \theta = 0.82$ |
| 29 | Coal crusher motor | 0.1633 | 0.0952 | 0.843 | 0.1320 | 0.0262 | W. 3P | $\beta = 8.42, \gamma = -1495, \theta = 6011$ | 0.0142 | 0.0000 | 0.00001 | 0.00005 | 0.00000 | W. 3P | $\beta = 2.30, \gamma = 2.23, \theta = 4.52$ |
| 30 | Coal storage tank | 0.0381 | 0.0122 | 0.1425 | 0.1156 | 0.0262 | LN | $\mu = 7.99, \sigma = 0.339$ | 0.0240 | 0.00088 | 0.00026 | 0.00043 | 0.00000 | W. 3P | $\beta = 2.12, \gamma = 14.95, \theta = 13.98$ |
| 31 | Pressure gauge | 0.9506 | 0.8135 | 0.4833 | 0.6627 | — | N | $\mu = 2868, \sigma = 1065$ | 0.2601 | 0.1171 | 0.0988 | 0.1456 | 0.0275 | W. 3P | $\beta = 1.73, \gamma = 0.49, \theta = 1.09$ |
| 32 | Steam circulation pipes | 0.4290 | 0.00588 | 0.00005 | 0.0000 | 0.0000 | W. 3P | $\beta = 6.05, \gamma = -1128, \theta = 5972$ | 0.2744 | 0.00078 | 0.00000 | 0.00011 | 0.00000 | W. 3P | $\beta = 2.35, \gamma = 0.28, \theta = 3.50$ |
| 33 | Pressure relief valve (PRV) station | 0.3538 | 0.2934 | 0.3933 | 0.5133 | 0.2870 | W. 3P | $\beta = 1.97, \gamma = 3240, \theta = 1329$ | 0.2744 | 0.00018 | 0.00001 | 0.00013 | 0.000000 | W. 3P | $\beta = 4.13, \gamma = -0.82, \theta = 4.22$ |
| 34 | Pressure reducing valve | 0.5596 | 0.4211 | 0.4283 | 0.3816 | — | W. 2P | $\beta = 11.3, \theta = 3529$ | 0.0147 | 0.0169 | 0.0563 | 0.0965 | 0.001352 | W. 3P | $\beta = 1.29, \gamma = 15.4, \theta = 15.9$ |
| 35 | Strainer | 0.9543 | 0.8017 | 0.5933 | 0.6501 | — | N | $\mu = 2816, \sigma = 912$ | 0.0637 | 0.0060 | 0.1438 | 0.0589 | 0.0106 | LN | $\mu = 0.808, \sigma = 0.55$ |
| 36 | Steam water separator | 0.1183 | 0.3622 | 0.3379 | 0.4885 | 0.2504 | Ex. 2P | $\mu = 832.9, \gamma = 3363$ | 0.2744 | 0.0509 | 0.0060 | 0.0069 | 0.0052 | W. 3P | $\beta = 2.59, \gamma = 0.74, \theta = 2.39$ |
| 37 | By-pass valve | 0.1195 | 0.0373 | 0.0249 | 0.0574 | 0.0152 | W. 3P | $\beta = 1.52, \gamma = 3158, \theta = 1315$ | 0.7357 | 0.3043 | 0.1573 | 0.1951 | 0.2172 | N | $\mu = 3.0, \sigma = 0.63$ |
| 38 | Safety valves | 0.1005 | 0.0252 | 0.0689 | 0.1068 | 0.3366 | W. 3P | $\beta = 1.58, \gamma = 2456, \theta = 2009$ | 0.7357 | 0.3891 | 0.1573 | 0.1931 | 0.2171 | N | $\mu = 2.0, \sigma = 0.63$ |
| 39 | Main steam stop valve | 0.1005 | 0.0252 | 0.0689 | 0.1068 | 0.3366 | W. 3P | $\beta = 1.58, \gamma = 2456, \theta = 2009$ | 0.0779 | 0.0931 | 0.0683 | 0.1322 | 0.0275 | W. 3P | $\beta = 1.58, \gamma = 1.28, \theta = 1.64$ |
| 41 | Gate valve | 0.6864 | 0.1509 | 0.2307 | 0.3521 | 0.1688 | LN | $\mu = 8.41, \sigma = 0.135$ | 0.3543 | 0.0822 | 0.0519 | 0.0888 | 0.0135 | W. 3P | $\beta = 2.01, \gamma = 1.09, \theta = 1.90$ |
| 42 | Globe valve | 0.6864 | 0.1509 | 0.2307 | 0.3521 | 0.1688 | LN | $\mu = 8.41, \sigma = 0.135$ | 0.3543 | 0.0822 | 0.0519 | 0.0888 | 0.0135 | W. 3P | $\beta = 2.01, \gamma = 1.09, \theta = 1.90$ |
| 43 | Ball valve | 0.6864 | 0.1509 | 0.2307 | 0.3521 | 0.1688 | LN | $\mu = 8.41, \sigma = 0.135$ | 0.3543 | 0.0822 | 0.0519 | 0.0888 | 0.0135 | W. 3P | $\beta = 2.01, \gamma = 1.09, \theta = 1.90$ |
| Group B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Feed water pump | 0.7473 | 0.4166 | 0.1166 | 0.1938 | 0.2221 | W. 2P | $\beta = 2.53, \theta = 2218,$ | 0.8157 | 0.6733 | 0.0141 | 0.4655 | 0.1241 | N | $\mu = 21, \sigma = 10.80$ |
| 11 | Feed water tank | 0.3887 | 0.0457 | 0.0683 | 0.0272 | — | W. 2P | $\beta = 2.53, \theta = 2218,$ | 0.0637 | 0.0771 | 0.1438 | 0.2036 | 0.0106 | W. 3P | $\beta = 1.41, \gamma = 4.49, \theta = 2.39$ |
| 15 | Strainer | 0.5916 | 0.3027 | 0.1462 | 0.1312 | 0.1179 | W. 3P | $\beta = 2.96, \gamma = 238, \theta = 914$ | 0.0233 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | W. 2P | $\beta = 2.06, \theta = 3.06$ |
| 18 | Drain pump | 0.7357 | 0.2416 | 0.1573 | 0.2552 | 0.2171 | N | $\mu = 1825, \sigma = 230$ | 0.1907 | 0.5101 | 0.4921 | 0.6283 | 0.3263 | Ex. 2P | $\mu = 0.51, \gamma = 0.792$ |
| 26 | Mechanical dust collector (MDC) | 0.7012 | 0.5783 | 0.5783 | 0.5170 | 0.1785 | W. 3P | $\beta = 10.05, \gamma = -457, \theta = 2263$ | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | Ex. 2P | $\mu = 4.41, \gamma = 6.91$ |
| 28 | Coal crusher | 0.5556 | 0.4154 | 0.4464 | 0.3608 | 0.1348 | W. 3P | $\beta = 2.08, \gamma = 307, \theta = 707$ | 0.7832 | 0.4199 | 0.0280 | 0.1961 | 0.0065 | N | $\mu = 9.14, \sigma = 4.59$ |
| Group C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Supply water temperature sensor | 0.0387 | 0.0000 | 0.00030 | 0.0001 | 0.0000 | W. 3P | $\beta = 1.51, \gamma = 136, \theta = 135,$ | 0.2115 | 0.1462 | 0.3933 | 0.2178 | 0.1181 | W. 3P | $\beta = 1.13, \gamma = 21.94, \theta = 0.77$ |
| 17 | Return water temperature sensor | 0.5622 | 0.8529 | 0.8529 | 0.9157 | — | Ex. 2P | $\mu = 69.7, \gamma = 329$ | 0.4291 | 0.0298 | 0.0112 | 0.0018 | 0.0015 | W. 3P | $\beta = 2.55, \gamma = -0.18, \theta = 2.98$ |
| 19 | Condensate filter | 0.0103 | 0.0437 | 0.0255 | 0.0926 | 0.0276 | Ex. 2P | $\mu = 89.1, \gamma = 151$ | 0.4000 | 0.4498 | 0.4283 | 0.5348 | 0.2505 | W. 3P | $\beta = 1.29, \gamma = 0.68, \theta = 0.813$ |
| 40 | Fusible plug | 0.2744 | 0.0917 | 0.1018 | 0.1047 | 0.0083 | W. 3P | $\beta = 4.69, \gamma = 32, \theta = 475$ | 0.8078 | 0.6571 | 0.6571 | 0.5279 | — | W. 2P | $\beta = 10.11, \theta = 1.98$ |

Note: Ex. 2P = exponential 2P, LN = log-normal, N = normal, W.2P = Weibull 2 parameter, W.3P = Weibull 3 parameter.

تجزیه و تحلیل در دسترس بودن

تحلیل در دسترس بودن بر اساس نتایج قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری زیرسیستم‌های دیگ بخار با استفاده از بیشترین توزیع احتمال و پارامترهای آن ارزیابی می‌شود. دیگ بخار یک سیستم پیچیده می‌باشد و بیشتر اجزا و زیرسیستم‌ها از ساختار سری یا موازی یا تشکیل شده‌اند. در اکثر موارد، زیرسیستم‌های دیگ بخار به صورت سری به هم متصل شده‌اند، به این معنی که، زمانی کل دیگ در شرایط کارکردی قرار می‌گیرد که همه زیرسیستم‌ها به طور صحیح و بدون خرابی کار کنند. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان دیگ با استفاده از چارچوب شرح داده شده در بخش قبلی انجام می‌شود. پایایی نظری همه زیرسیستم‌ها در بازه‌های زمانی مختلف با استفاده از بهترین توزیع محاسبه می‌شود که بسته نرم‌افزاری 10++WEIBULL'S RELIASOFT برای همین مورد استفاده می‌شود. جدول (۴) عمر قابل اعتماد در روز مشخص را در سطح قابلیت اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ و ۹۰٪ و ۸۰٪ و ۷۵٪ و ۵۰٪، نمایش می‌دهد. همچنین پایایی تمامی زیرسیستم‌ها در پایان ۱۴۶۰ روز، ۲۹۲۰ روز، ۴۳۸۰ روز و ۵۸۴۰ روز محاسبه شده است. سپس قابلیت اطمینان سیستم دیگ بخار و زیرسیستم‌های آن محاسبه و در جدول (۵) خلاصه شده است. جدول (۶) تجزیه و تحلیل قابلیت نگهداری زیرسیستم‌های دیگ بخار را نشان می‌دهد. استراتژی تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی شده بر اساس این مفهوم است که هر جزء/عنصر دیگ بخار در دوره‌ای نگهداری می‌شود که ایمنی و قابلیت اطمینان عملیاتی را تضمین می‌کند. فواصل تعمیر و نگهداری برای دستیابی به سطوح قابلیت اطمینان عملیاتی متمایز محاسبه شده است. از این جداول مشاهده می‌شود که با افزایش زمان مأموریت، قابلیت اطمینان سیستم بویلر و قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب اطمینان سیستم گردش بخار بسیار کمتر بوده و بعد از شانزده سال کارکرد ۰.۰۱۵ می‌باشد و برای سیستم دمنده بالاتر است و زمان مورد نیاز برای تعمیر سیستم احتراق با میانگین زمان تعمیر بیشتر است و MTTR نزدیک به ۳۲ ساعت است. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان کارکرد، قابلیت اطمینان دیگ در حال کاهش است. شکل (۱۰) قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های دیگ بخار را در دوره‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. مهم‌ترین سیستم‌ها، سیستم احتراق (CIS) و زیرسیستم‌های دمش (BDS) می‌باشند. برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم، ابتدا باید روی بهبود قابلیت اطمینان سیستم احتراق و زیرسیستم دمش تمرکز شود. به همین ترتیب، در دسترس بودن عملیاتی زیرسیستم‌ها را می‌توان با فرمول زیر محاسبه کرد [10]:

$$A_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

با قرار دادن این مقادیر MTBF و MTTR سیستم احتراق (CIS) در معادله بالا، می‌توان در دسترس بودن این سیستم را محاسبه کرد [10]:

$$A_{op} = \frac{62,400}{62,400 + 31.5573} = 0.988$$

به طور مشابه، تجزیه و تحلیل در دسترس بودن همه زیرسیستم‌ها انجام شده و در جدول (۶) ارائه شده است. یافته‌های تجزیه و تحلیل در دسترس بودن نشان می‌دهد که همه زیرسیستم‌های دیگر بخار بیش از ۹۸٪ در دسترس هستند و سیستم احتراق کمتر در دسترس می‌باشد. تجزیه و تحلیل RAM نشان می‌دهد که سیستم احتراق (CIS) از دیدگاه قابلیت اطمینان و در دسترس بودن، زیرسیستم مهمی است. قابلیت اطمینان سیستم به قابلیت اطمینان اجزا و زیرسیستم‌ها بستگی دارد. این مقاله تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان ۴۳ جزء سیستم دیگر بخار را ارائه می‌دهد. اجزای سیستم بویلر بر اساس مقادیر داده‌های TTF به گروه‌های A، B و C دسته‌بندی می‌شوند. جدول (۷) قابلیت اطمینان در دوره‌های زمانی مختلف، تعمیر و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان در سطوح مختلف قابلیت اطمینان MTBF و MTTR را برای تمام ۴۳ جزء دیگر نشان می‌دهد. یک مدل توزیع احتمال می‌تواند برای تصمیم‌گیری فاصله PM^{14} استفاده شود که به رسیدن به سطح قابلیت اطمینان عملیاتی موردنیاز کمک می‌کند. فواصل تعمیر و نگهداری در سطوح قابلیت اطمینان ۰.۹۵، ۰.۹۰، ۰.۷۵، و ۰.۵۰ ارزیابی شده و نتایج در جدول (۷) ارائه شده است. از این تجزیه و تحلیل می‌توان نتیجه گرفت که تعمیر و نگهداری لوله‌های دیگر باید قبل از ۳۵۴۷ روز انجام شود تا قابلیت اطمینان ۹۰ درصد بدست آید. با توجه به هزینه، ایمنی و اثربخشی عملیاتی، پیشنهاد می‌شود که تعمیر و نگهداری سیستم دیگر بخار با قابلیت اطمینان ۷۵ درصد انجام شود [10].

جدول ۴ عمر مورد انتظار ($MTBF$)، عمر طراحی و قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های دیگر بخار [10]

| Subsystem | Design life (in days) for a given reliability | | | | | | Reliability at a given time | | | | |
|-----------|---|--------|--------|--------|---------|---------|-----------------------------|--------|--------|--------|-------------|
| | 0.99 | 0.95 | 0.90 | 0.80 | 0.75 | 0.50 | 1460 | 2920 | 4380 | 5840 | MTBF (days) |
| CIS | 26.13 | 133.3 | 273.9 | 580.1 | 747.9 | 1802.19 | 0.570 | 0.325 | 0.185 | 0.106 | 2600.0 |
| FWS | 0 | 388.9 | 757.9 | 1323.2 | 1570.69 | 2731.84 | 0.7727 | 0.4609 | 0.2122 | 0.0760 | 2966.68 |
| BDS | 52.37 | 134.05 | 255.98 | 548.52 | 718.70 | 1879.3 | 0.5760 | 0.3569 | 0.2276 | 0.1477 | 2999.11 |
| ECS | 987.48 | 1747.6 | 2152.9 | 2643.6 | 2830.04 | 3582.40 | 0.9714 | 0.7236 | 0.2372 | 0.0214 | 3582.40 |
| FSS | 0 | 429.15 | 1018.0 | 1731.0 | 2001.95 | 3095.19 | 0.8434 | 0.5430 | 0.2139 | 0.0451 | 3095.19 |
| SCS | 1516.67 | 2172.2 | 2521.6 | 2944.7 | 3105.52 | 3754.28 | 0.9914 | 0.8071 | 0.2576 | 0.015 | 3754.28 |
| CS | 0 | 0 | 652.40 | 1478.8 | 1792.86 | 3060.00 | 0.8028 | 0.5297 | 0.2411 | 0.0694 | 3060.00 |
| OS | 3416.89 | 3704.8 | 3868.1 | 4075.4 | 4157.15 | 4503.71 | 1.00 | 0.9998 | 0.5927 | 0.0143 | 4535.55 |

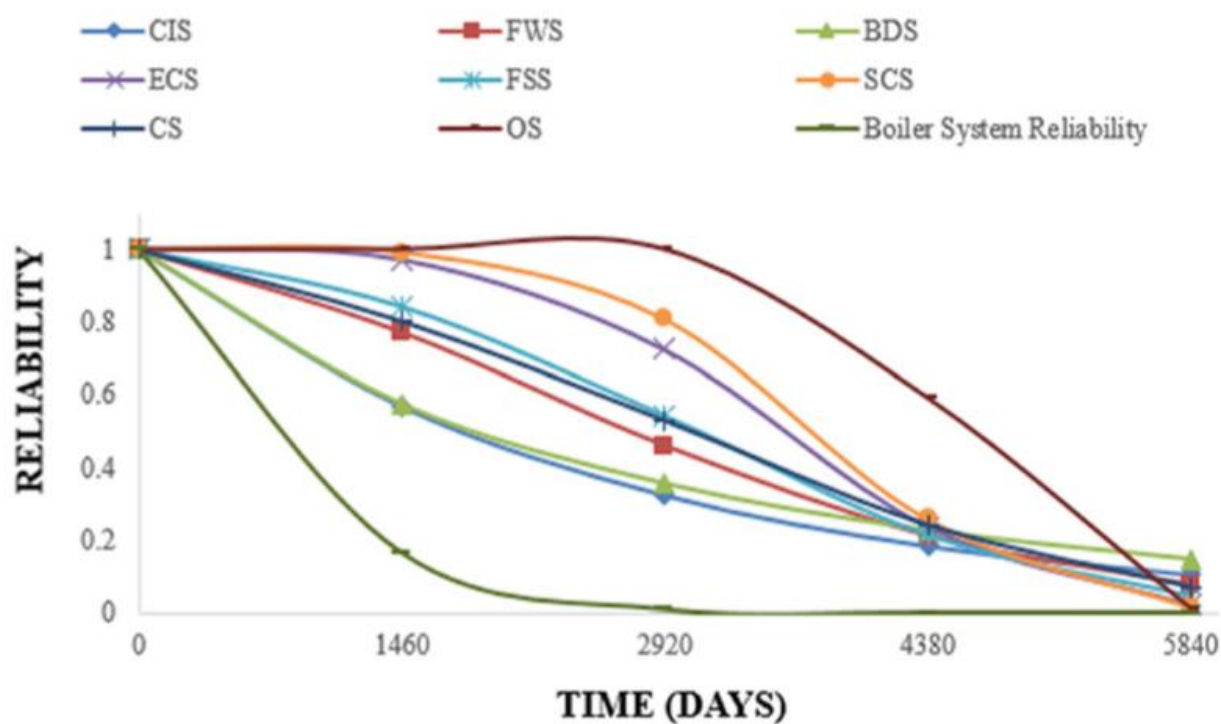
¹⁴ Preventive maintenance intervals

جدول ۵ قابلیت اطمینان سیستم بویلر از طریق قابلیت اطمینان زیرسیستم [10]

| Time in days | CIS | FWS | BDS | ECS | FSS | SCS | CS | OS | Boiler system reliability |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|
| 1460 | 0.57 | 0.7727 | 0.576 | 0.9714 | 0.8434 | 0.9914 | 0.8028 | 1 | 0.16542 |
| 2920 | 0.325 | 0.4609 | 0.3569 | 0.7236 | 0.543 | 0.8071 | 0.5297 | 0.9998 | 0.00890 |
| 4380 | 0.185 | 0.2122 | 0.2276 | 0.2372 | 0.2139 | 0.2576 | 0.2411 | 0.5927 | 0.00002 |
| 5840 | 0.106 | 0.076 | 0.1477 | 0.0214 | 0.0451 | 0.015 | 0.0694 | 0.0143 | 0.00000 |

جدول ۶ تجزیه و تحلیل قابلیت نگهداری و در دسترس بودن زیرسیستم های دیگ بخار [10]

| Sr. no. | Subassembly | Repair hours at different reliability level | | | | | MTTR (h) | MTBF (h) | Availability |
|------------------------------|-------------|---|--------|--------|--------|--------|----------|----------|--------------|
| | | 99% | 95% | 90% | 75% | 50% | | | |
| 1 | CIS | 0.3915 | 3.9816 | 7.2159 | 15.098 | 27.627 | 31.5578 | 62,400 | 0.988 |
| 2 | FWS | 0.5007 | 0.5707 | 0.7481 | 1.8721 | 6.5758 | 17.7900 | 71,200.3 | 0.994 |
| 3 | BDS | 0.8828 | 0.9093 | 0.9616 | 1.2210 | 02.076 | 3.4108 | 71,978.6 | 0.998 |
| 4 | ECS | 3.0308 | 3.8141 | 4.3113 | 5.2910 | 6.6427 | 7.0315 | 85,977.6 | 0.998 |
| 5 | FSS | 0.7053 | 0.9004 | 1.2359 | 2.6891 | 6.8544 | 12.0161 | 74,284.5 | 0.996 |
| 6 | SCS | 0.9846 | 1.0145 | 1.0879 | 1.5387 | 3.3684 | 7.5143 | 90,102.7 | 0.998 |
| 7 | CS | 1.0870 | 1.3206 | 1.4649 | 1.7422 | 2.1123 | 2.2001 | 73,440 | 0.999 |
| 8 | OS | 1.4132 | 1.6283 | 1.7964 | 2.1609 | 2.6731 | 2.7684 | 108,853 | 0.999 |
| Boiler system availability = | | | | | | | | | 0.9703 |

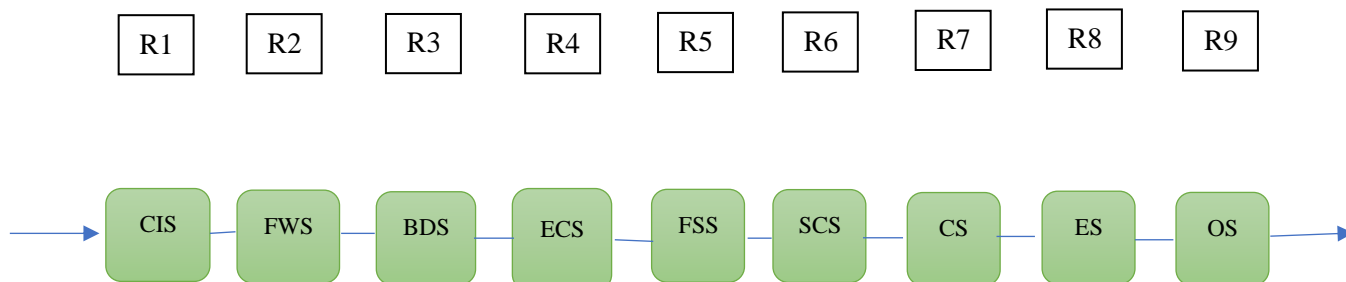


شکل ۱۰ نمودار اهمیت قابلیت اطمینان برای زیرسیستم های دیگ بخار [10]

جدول ۷ قابلیت اطمینان، عمر قابل اعتماد، و MTBF/جزای دیگ بخار [10]

| | | Reliable life in days for a given reliability | | | | | Reliability at a given time (days) | | | | | | |
|---------|--|---|------|------|------|------|------------------------------------|--------|---------|--------|---------|----------|-------------|
| Sr. no. | Component | 99% | 95% | 90% | 75% | 50% | 1095 | 2190 | 3285 | 4380 | 5475 | MTTR (h) | MTBF (days) |
| Group A | | | | | | | | | | | | | |
| 01 | Header | 3160 | 3194 | 3239 | 3392 | 3731 | 1.00 | 1.00 | 0.8528 | 0.2302 | 0.0621 | 34.00 | 3988 |
| 02 | Hot gas tubes | 3160 | 3194 | 3239 | 3392 | 3731 | 1.00 | 1.00 | 0.8528 | 0.2302 | 0.0621 | 36.29 | 3988 |
| 03 | Furnace/shell | 2610 | 2777 | 2936 | 3340 | 4010 | 1.00 | 1.00 | 0.7714 | 0.3830 | 0.1507 | 58.11 | 4253 |
| 04 | Intake vent/air vent | 2314 | 2695 | 2923 | 3347 | 3892 | 1.00 | 0.9949 | 0.7761 | 0.2986 | 0.0633 | 8.00 | 3990 |
| 05 | Water tubes | 3294 | 3424 | 3547 | 3860 | 4380 | 1.00 | 1.00 | 0.9920 | 0.5002 | 0.1586 | 35.97 | 4569 |
| 07 | Back flow preventer valve | 1218 | 1773 | 2093 | 2639 | 3231 | 0.9937 | 0.8798 | 0.4751 | 0.0747 | 0.0010 | 1.528 | 3202 |
| 09 | Feed water pump-gauge | 269 | 595 | 844 | 1377 | 2113 | 0.8356 | 0.4744 | 0.1780 | 0.0451 | 0.00745 | 1.528 | 2237 |
| 10 | Softeners | 1828 | 2289 | 2528 | 2903 | 3276 | 0.9997 | 0.9635 | 0.4935 | 0.0031 | 0.0000 | 46.49 | 3229 |
| 12 | Water level controller | 2716 | 3196 | 3438 | 3813 | 4178 | 1.00 | 0.9989 | 0.9350 | 0.3374 | 0.0001 | 6.996 | 4126 |
| 13 | Feed check valve | 3583 | 3938 | 4128 | 4445 | 4797 | 1.00 | 1.00 | 0.9981 | 0.7879 | 0.0969 | 1.2568 | 4797 |
| 14 | Feed water hose | 2611 | 2762 | 2903 | 3258 | 3841 | 1.00 | 1.00 | 0.7381 | 0.3142 | 0.0989 | 9.887 | 4046 |
| 16 | De-aerator | 3248 | 3226 | 3683 | 3962 | 4296 | 1.00 | 1.00 | 0.9872 | 0.4365 | 0.0218 | 43.372 | 4327 |
| 20 | Shut-off valve | 3335 | 3431 | 3526 | 3780 | 4222 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.4241 | 0.1095 | 1.4825 | 4408 |
| 21 | Blow-down connections | 3395 | 3452 | 3518 | 3713 | 4099 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.3637 | 0.0942 | 6.0835 | 4322 |
| 22 | Blow down valve | 2632 | 2793 | 2935 | 3281 | 3825 | 1.00 | 1.00 | 0.7482 | 0.2926 | 0.0752 | 6.0835 | 3990 |
| 23 | Induced drum (ID) fan | 2496 | 2995 | 3246 | 3633 | 4010 | 0.9999 | 0.9969 | 0.8895 | 0.2183 | 0.0000 | 6.489 | 3955 |
| 24 | Forced draft (FD) fan | 3371 | 3406 | 3451 | 3603 | 3940 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.2950 | 0.0792 | 6.489 | 4196 |
| 25 | Secondary air (SA) fan | 3221 | 3344 | 3457 | 3737 | 4191 | 1.00 | 1.00 | 0.9717 | 0.4089 | 0.09405 | 5.654 | 4343 |
| 27 | Rack and pinion coal feeding mechanism | 3025 | 3458 | 3688 | 4073 | 4501 | 1.00 | 0.9998 | 0.9724 | 0.5760 | 0.0625 | 1.379 | 4501 |
| 29 | Coal crusher motor | 1986 | 2729 | 3106 | 3688 | 4259 | 0.9991 | 0.9839 | 0.8647 | 0.4378 | 0.0306 | 6.238 | 4178 |
| 30 | Coal storage tank | 1352 | 1705 | 1928 | 2370 | 2980 | 0.9984 | 0.8179 | 0.3871 | 0.1283 | 0.0366 | 27.336 | 3156 |
| 31 | Pressure gauge | 391 | 1116 | 1503 | 2149 | 2867 | 0.9520 | 0.7378 | 0.3475 | 0.0777 | 0.0071 | 1.471 | 2867 |
| 32 | Steam circulation pipes | 1664 | 2527 | 2989 | 3732 | 4492 | 0.9974 | 0.9718 | 0.8518 | 0.5414 | 0.1589 | 3.393 | 4414 |
| 33 | Pressure relief valve (PRV) station | 3368 | 3533 | 3663 | 3945 | 4343 | 1.00 | 1.00 | 0.9987 | 0.4774 | 0.0621 | 3.0046 | 4418 |
| 34 | Pressure reducing valve | 2349 | 2713 | 2891 | 3160 | 3416 | 0.9999 | 0.9954 | 0.6406 | 0.0000 | 0.0000 | 30.114 | 3373 |
| 35 | Strainer | 694 | 1315 | 1647 | 2200 | 2815 | 0.9704 | 0.7536 | 0.3034 | 0.0431 | 0.0017 | 2.610 | 2815 |
| 36 | Steam water separator | 3371 | 3406 | 3451 | 3603 | 3940 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.2950 | 0.0792 | 2.870 | 4196 |
| 37 | By-pass valve | 3221 | 3344 | 3457 | 3737 | 4191 | 1.00 | 1.00 | 0.9717 | 0.4089 | 0.0940 | 3.00 | 4343 |
| 38 | Safety valves | 2564 | 2762 | 2939 | 3368 | 4049 | 1.00 | 1.00 | 0.7811 | 0.3929 | 0.1490 | 2.00 | 4259 |
| 39 | Main steam stop valve | 2564 | 2762 | 2939 | 3368 | 4049 | 1.00 | 1.00 | 0.7811 | 0.3929 | 0.1490 | 2.758 | 4259 |
| 41 | Gate valve | 3291 | 3608 | 3789 | 4112 | 4503 | 1.00 | 1.00 | 0.9903 | 0.5818 | 0.0736 | 2.773 | 4544 |
| 42 | Globe valve | 3291 | 3608 | 3789 | 4112 | 4503 | 1.00 | 1.00 | 0.9903 | 0.5818 | 0.0736 | 2.773 | 4544 |
| 43 | Ball valve | 3291 | 3608 | 3789 | 4112 | 4503 | 1.00 | 1.00 | 0.9903 | 0.5818 | 0.0736 | 2.773 | 4544 |
| Group B | | | | | | | | | | | | | |
| Sr. no. | Component name | 99% | 95% | 90% | 75% | 50% | 365 | 730 | 1095 | 1460 | 1825 | MTTR (h) | MTBF (days) |
| 08 | Feed water pump | 361 | 687 | 912 | 1356 | 1919 | 0.9897 | 0.9419 | 0.8460 | 0.7071 | 0.5432 | 21.00 | 1968 |
| 11 | Feed water tank | 435 | 648 | 772 | 985 | 1221 | 0.9951 | 0.9197 | 0.6422 | 0.2359 | 0.0269 | 6.6652 | 1211 |
| 15 | Strainer | 430 | 572 | 664 | 837 | 1045 | 0.9970 | 0.8519 | 0.4373 | 0.0942 | 0.00601 | 2.7129 | 1053 |
| 18 | Drain pump | 1289 | 1446 | 1529 | 1669 | 1824 | 1.00 | 0.9999 | 0.9992 | 0.9435 | 0.5000 | 1.302 | 1824 |
| 26 | Mechanical dust collector | 975 | 1227 | 1352 | 1542 | 1725 | 0.9999 | 0.9984 | 0.9777 | 0.8283 | 0.3374 | 11.319 | 1696 |
| 28 | Coal crusher | 384 | 476 | 547 | 695 | 900 | 0.9945 | 0.7098 | 0.2864 | 0.0633 | 0.0075 | 9.142 | 934 |
| Group C | | | | | | | | | | | | | |
| Sr. no. | Component name | 99% | 95% | 90% | 75% | 50% | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | MTTR (h) | MTBF (days) |
| 06 | Supply water temperature sensor | 142 | 154 | 166 | 195 | 241 | 1.00 | 0.5096 | 0.1169 | 0.0165 | 0.0015 | 1.086 | 257 |
| 17 | Return water temperature sensor | 329 | 332 | 336 | 349 | 377 | 1.00 | 1.00 | 0.06409 | 0.1146 | 0.0204 | 2.466 | 398 |
| 19 | Condensate filter | 151 | 155 | 160 | 176 | 212 | 1.00 | 0.3680 | 0.0957 | 0.0249 | 0.0064 | 1.432 | 240 |
| 40 | Fusible plug | 210 | 284 | 326 | 396 | 471 | 0.9996 | 0.9794 | 0.8390 | 0.4689 | 0.09973 | 1.886 | 466 |

و همچنین شماتیک کلی یا همان دیاگرام بلوکی برای این بویلر با توجه به زیرسیستم‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش، به صورت مشاهده شده در شکل (۱۱) می‌باشد:



شکل ۱۱ شماتیک بلوک دیاگرام بویلر در این مقاله

قابلیت اطمینان کل سیستم بویلر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{\text{Total_Boiler}} = R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5 * R_6 * R_7 * R_8 * R_9$$

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله اول

این تحقیق تجزیه و تحلیل کیفی و کمی قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری سیستم دیگ بخار را ارائه می‌دهد. در این زمینه، یک چارچوب تعمیر‌یافته ساده برای تجزیه و تحلیل داده‌های خرابی یک سیستم بویلر معمولی ارائه شده است. مجموعه داده‌های TTF/TTR همه زیرسیستم‌ها مستقل و به طور یکسان توزیع شده‌اند. از این تجزیه و تحلیل، نتیجه می‌گیریم که اکثر اجزا و زیرسیستم‌های بویلر از توزیع Weibull پیروی می‌کنند، اگرچه FWS^{15} و SCS^{16} فراوانی‌های خرابی بالاتری نسبت به سایر زیرسیستم‌ها دارند. FWS و CIS^{17} از توزیع Weibull با بتا بزرگ‌تر از یک پیروی می‌کنند، که افزایش نرخ شکست را به دلیل روند استهلاک را نشان می‌دهد، و BDS^{18} با کاهش نرخ شکست دنبال می‌شود که دارای بتا کوچک‌تر از یک بوده، یعنی در دوره ابتدایی (Burn_in) است. در دسترس بودن سیستم بویلر به قابلیت اطمینان و نگهداری زیرسیستم‌ها و اجزا بستگی دارد. سطوح مختلف RAM چندین زیرسیستم و بخش دیگ بخار در این مطالعه تعیین شده است. بر اساس مطالعه قابلیت اطمینان، برنامه نگهداری پیشگیرانه برای قطعات و زیرسیستم‌ها تعیین شده است. ارزیابی RAM نشان داده است که سیستم احتراق یک زیرسیستم مهم از منظر قابلیت اطمینان و در دسترس بودن است و به منظور افزایش در دسترس بودن آن، پیشنهاد می‌شود که منابع نگهداری باید در لحظه مناسب به سیستم احتراق تخصیص داده شود. این تجزیه و تحلیل همچنین نشان می‌دهد که TTR برای سیستم احتراق طولانی‌تر از زیر سیستم‌های دیگر است. بنابراین، برای کاهش زمان تعمیر سیستم احتراق، روش‌های نگهداری مناسب برای افزایش در دسترس بودن بویلر ضروری می‌باشد. تجزیه و تحلیل همچنین نشان می‌دهد که سیستم احتراق (CIS) و سیستم تغذیه آب (FWS) از دلایل اصلی خرابی دیگ بخار هستند، قطعاتی مانند مخزن تغذیه آب، پمپ تغذیه آب، سنسور دمای تغذیه آب، صافی، سنسور دمای آب برگشتی، فیلتر میعانات، گردگیر مکانیکی گرد و غبار و سنگ شکن زغال سنگ، با قابلیت اطمینان پایین یافت می‌شوند. اگر تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) این قطعات با نرخ اطمینان حداقل ۷۵٪ بدون در نظر گرفتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری انجام شود، قابلیت اطمینان سیستم بهبود می‌یابد و در نتیجه در دسترس بودن دیگ بخار نیز بهبود می‌یابد [10].

¹⁵ Feed water supply system

¹⁶ Steam circulation system

¹⁷ Combustion and ignition system

¹⁸ Blow-down system

جدول توضیحات حروف مخفف

جدول ۸ حروف مخفف استفاده شده و اسم کامل آنها

| Full name | Abbreviation | Full name | Abbreviation |
|--|--------------|--------------------------------|--------------|
| Operational availability | Aop | Time to failure | TTF |
| Forced draft fan | FD fan | Time to repair | TTR |
| Induced draft fan | ID fan | Combustion and ignition system | CIS |
| Kolmogorov–Smirnov test | K–S test | Feed water supply system | FWS |
| Mechanical dust collector | MDC | Blow-down system | BDS |
| Mean time between failure | MTBF | Emission control system | ECS |
| Mean time to failure | MTTF | Fuel-supply system | FSS |
| Mean time to repair | MTTR | Steam circulation system | SCS |
| Reliability, availability, maintainability, and safety | RAMS | Control system | CS |
| Renewal process | RP | Electrical system | ES |
| Secondary air fan | SA fan | Other systems | OS |
| Time between failure | TBF | | |

مقاله دوم

این مطالعه در کشور اندونزی توسط ایننگ پامونگکاس (Iing Pamungkas) و همکاران در سال ۲۰۲۰ مورد پژوهش قرار گرفته است که به بررسی قابلیت اطمینان بویلر بخار پرداخته است [16].

توضیحات مقاله دوم

این مطالعه از رویکرد تحلیل مدهای خرابی و آنالیز اثرات (FMEA¹⁹) برای انجام تحلیل ریسک و رویکرد قابلیت اطمینان برای تعیین سطح قابلیت اطمینان اجزای حیاتی دیگ بخار در نیروگاههای بخار، استفاده می‌کند. و علت استفاده از این مقاله در این پروژه شباهت‌های موجود بین بویلرهای صنایع مختلف و اینکه اکثر اجزاء بویلرهای صنایع معمولاً یکسان بوده و فقط ظرفیت متفاوتی دارند، می‌باشد. این مطالعه اجزای حیاتی دیگ، حالت‌های خرابی، علل خرابی و اثرات خرابی را شناسایی می‌کند و سپس شدت، وقوع و تشخیص، را برای بدست آوردن یک اولویت ریسک (RPN²⁰) ارزیابی می‌کند و جزء بحرانی دیگ بخار با بالاترین خطر برای قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. نتایج این مطالعه بالاترین خطر را در چهار جزء حیاتی بویلر، یعنی جداکننده‌های سیکلون^{۲۱}، فن هوای اولیه^{۲۲} (پنکه PA)، تغذیه زغال‌سنگ^{۲۳} و فن القایی^{۲۴} (فن ID) نشان

¹⁹ Failure mode and effect analysis

²⁰ Risk priority number

²¹ Cyclone separators

²² Primary air fan

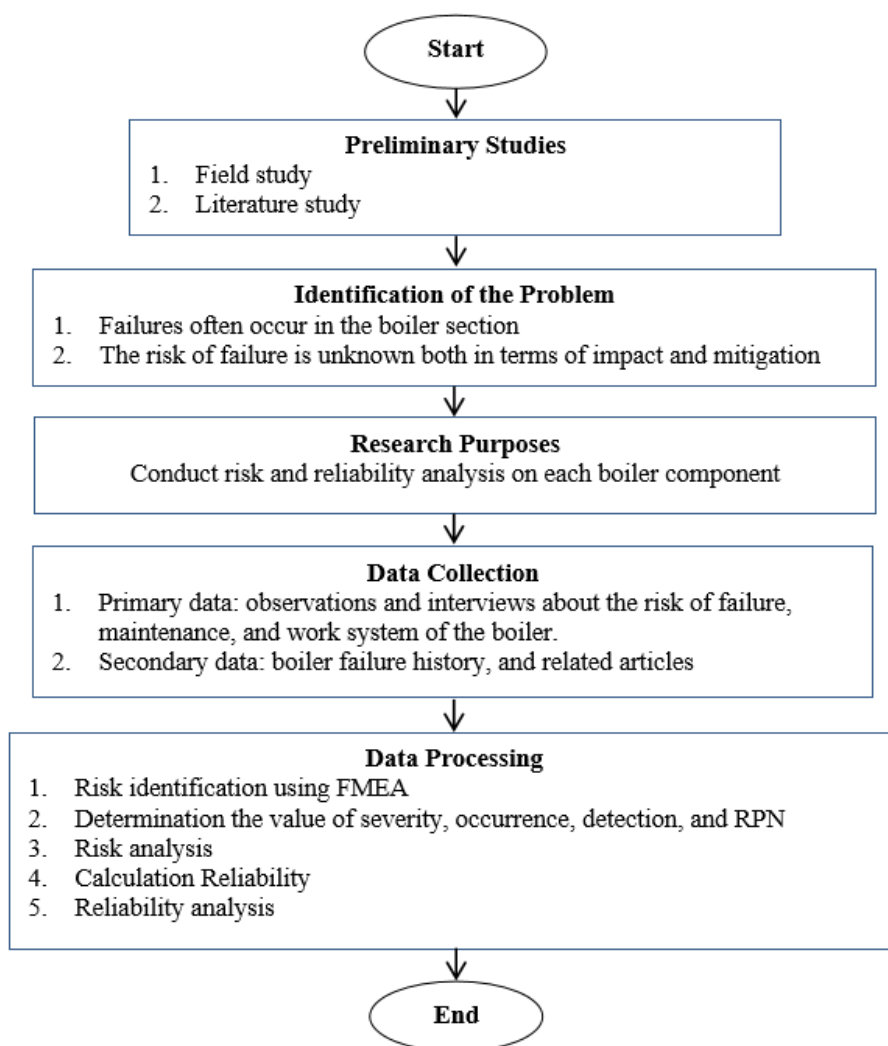
²³ Coal feeder

²⁴ Induced draft fan

می‌دهد. در حالی که نتایج محاسبه قابلیت اطمینان برای چهار مؤلفه معرفی شده، میانگین مقدار قابلیت اطمینان به دست آمده زیر پنجاه درصد را نمایش می‌دهد که قابلیت اطمینان پایینی می‌باشد. نتایج تجزیه و تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که برای به حداقل رساندن ریسک و بهبود قابلیت اطمینان اجزای حیاتی دیگر، استفاده از روش‌های تشخیصی، انجام کنترل‌های پیشگیرانه، استفاده از تکنیک‌های مدیریت بصری، استفاده از حسگرها برای تشخیص خرابی‌ها و انجام تعمیرات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی شده، برای پیشگیری از قطعی غیرمنتظره در سیستم تولید، ضروری می‌باشد [16].

روش انجام تحقیق در این مقاله

در این مقاله، تمرکز بر روی قطعاتی از دیگ بخار می‌باشد که به دفعات دچار خرابی یا آسیب شده‌اند. شکل (۱۲) مراحل انجام شده در این مطالعه را نشان می‌دهد و در قالب فلوجارت نمایش داده شده است.



شکل ۱۲ نمودار جریان تحقیق در این مقاله [16]

توضیحات و مراحل این تحقیق در این مقاله

روش تحلیل مدهای خرابی و آنالیز اثرات (FMEA)، مبتنی بر کشف، تنظیم و کاهش خرابی‌ها یا خطاها می‌باشد که در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش را می‌توان برای سیستم‌های تولید انرژی مانند نیروگاه‌های بخار متشکل از سیستم‌های پیچیده‌ای از اجزای مکانیکی و الکتریکی، استفاده کرد. این روش از سه عامل خطر برای شناسایی حالت‌های خرابی استفاده می‌کند که عبارتند از وقوع^{۲۵} (O)، قابلیت تشخیص^{۲۶} (D) و شدت^{۲۷} (S). هر عامل خطر در قالب یک شماره اولویت ریسک (RPN^{۲۸}) نشان داده می‌شود. سه پارامتر ورودی در یک مقیاس ۱۰ نقطه‌ای رتبه‌بندی می‌شوند. در این مقاله، شانزده جزء بویلر که به طور مکرر دچار خرابی یا آسیب می‌شوند، با استفاده از شماره اولویت ریسک (RPN) ارزیابی شده‌اند. ابتدا حالت‌های خرابی، علل خرابی و اثرات خرابی اجزای دیگر شناسایی می‌شوند. جدول (۹) تجزیه و تحلیل حالت و اثر خرابی (FMEA) اجزای حیاتی بویلر و جدول (۱۰) شماره اولویت خطر (RPN) اجزای حیاتی دیگر را نشان می‌دهد [16].

جدول ۹ تجزیه و تحلیل حالت و اثر شکست (FMEA) اجزای حیاتی بویلر [16]

| Component | Failure Mode | Cause Failure | Failure Effect |
|----------------------------|--|---|--|
| Hopper | Obstacles due to hopper ash | Lots of ash piled up | Hopper is stuck |
| Conveyor | Broken scraper conveyor | Coal overcapacity | Conveyor is stuck or not working |
| Coal feeder | Leakage on outlet flange | Coal stacking | coal feeder cannot operate |
| Furnace Steam Drum | High pressure furnace Pipe level transmitter, outbreak of cladding | Insert the air heating element High pressure steam heat | Unit trip Unit trip |
| Cyclone Separator | Manhole u-beam | No visual inspection was performed on the return leg | Solid particles accumulate in the fluid system |
| Desuperheater | Bypass valve, outlet valve and control valve | The steam isn't right | Turbine cannot operate |
| Economizer | Drain pipe is leaking | High pressure steam heat | Wasted heat |
| Downcomer | Drain pipe is leaking | High pressure steam heat as | Wasted heat |
| Sootblower | Sootblower C30 | There is no visual inspection | Pile of dirt in the pipe |
| Burner | Burner trip | Loss of flame, module flame is damaged, dirty flame scanner | Derating |
| Slag Cooler | Leaking on the slag cooler | High pressure steam heat | Slag piled up |
| Induced Draft Fan (ID Fan) | Air turbulence in the fan, unbalanced rotor | Valve opening does not comply with S.O.P, there is wear on the fan blades | High vibration |
| Primary Air Fan (PA Fan) | Air turbulence in the fan, unbalanced rotor | Valve opening does not comply with S.O.P, there is wear on the fan blades | High vibration |

²⁵ Occurrence

²⁶ Detectability

²⁷ Severity

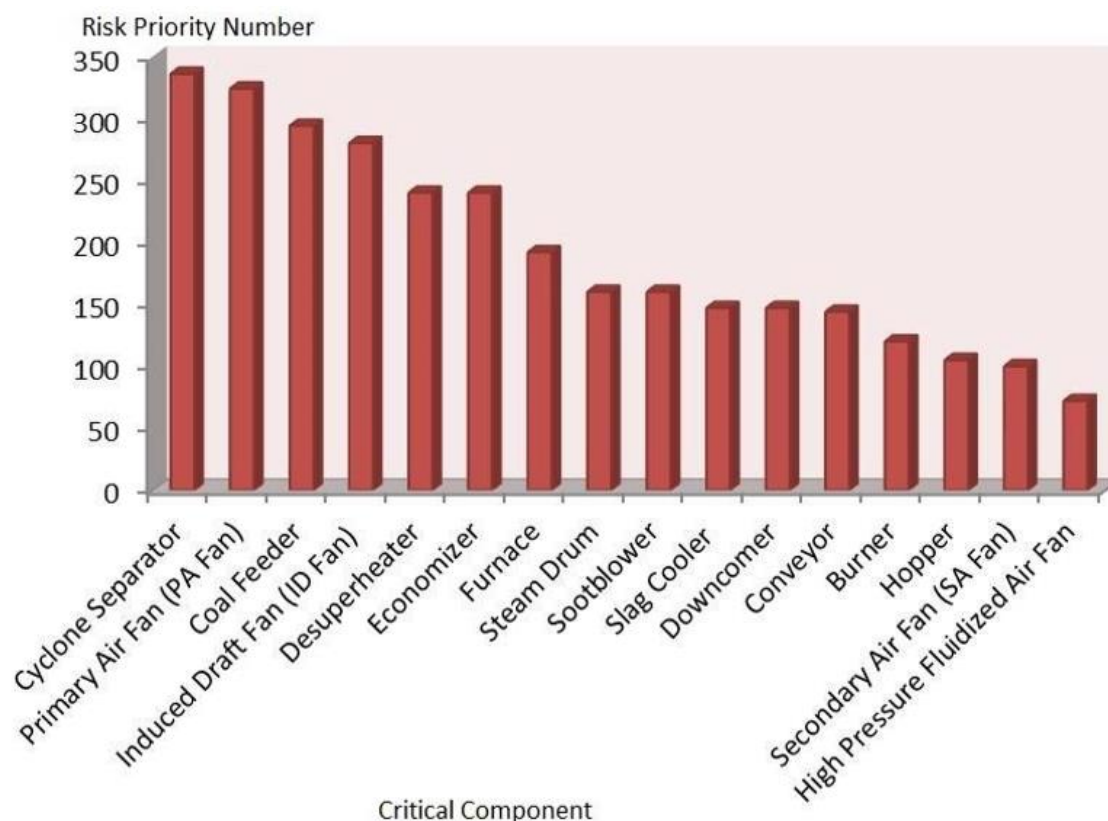
²⁸ Risk Priority Number

| | | | |
|---------------------------------|---|---|----------------|
| Secondary Air Fan (SA Fan) | Air turbulence in the fan, unbalanced rotor | Valve opening does not comply with S.O.P, there is wear on the fan blades | High vibration |
| High Pressure Fluidized Air Fan | Air turbulence in the fan, unbalanced rotor | Valve opening does not comply with S.O.P, there is wear on the fan blades | High vibration |

جدول ۱۰ شماره اولویت ریسک (RPN) اجزای حیاتی دیگ [16]

| No | Component | Severity | Occurrence | Detection | RPN | Category |
|----|---------------------------------|----------|------------|-----------|-----|---------------|
| 1 | Cyclone Separator | 8 | 7 | 6 | 336 | High risk |
| 2 | Primary Air Fan (PA Fan) | 6 | 6 | 9 | 324 | |
| 3 | Coal Feeder | 7 | 6 | 7 | 294 | |
| 4 | Induced Draft Fan (ID Fan) | 5 | 7 | 8 | 280 | |
| 5 | Desuperheater | 8 | 5 | 6 | 240 | Moderate risk |
| 6 | Economizer | 8 | 6 | 5 | 240 | |
| 7 | Furnace | 8 | 4 | 6 | 192 | |
| 8 | Steam Drum | 8 | 4 | 5 | 160 | |
| 9 | Sootblower | 8 | 4 | 5 | 160 | |
| 10 | Slag Cooler | 7 | 3 | 7 | 147 | Low risk |
| 11 | Downcomer | 7 | 3 | 7 | 147 | |
| 12 | Conveyor | 8 | 3 | 6 | 144 | |
| 13 | Burner | 6 | 4 | 5 | 120 | |
| 14 | Hopper | 5 | 3 | 7 | 105 | |
| 15 | Secondary Air Fan (SA Fan) | 5 | 4 | 5 | 100 | |
| 16 | High Pressure Fluidized Air Fan | 4 | 3 | 6 | 72 | |

پس از ارزیابی RPN، بالاترین مقادیر به وضوح در شکل (۱۳) دیده می‌شود. شانزده جزء بیشترین توجه و نگرانی را به خود معطوف کرده‌اند چون با توجه به تاثیر بالایی که روی خرابی نیروگاه بخار دارند، بیشترین تمرکز باید روی آنها باشد. مرحله بعدی تجزیه و تحلیل خروجی FMEA است که در آن حالت شکست به شدت، وقوع و تشخیص بستگی دارد. RPN به سه سطح ریسک، یعنی کم خطر (۱-۱۴۹)، ریسک متوسط (۱۵۰-۲۴۹) و ریسک بالا (۲۵۰-۳۴۰) طبقه بندی می‌شود. تجزیه و تحلیل خروجی FMEA بر روی چندین بخش از بخش‌های دیگ بخار که دارای ریسک بالا یا سطح بحرانی بالایی هستند، مانند تغذیه زغال سنگ، جداکننده سیکلون، فن پیشروی القایی (فن‌های ID) و فن اولیه (فن‌های PA) انجام می‌شود. برای کاهش ریسک سیستم نیروگاه بخار باید به این موارد بیشتر توجه شود. شکل (۱۳) بیشترین تا کمترین RPN را در هر جزء حیاتی دیگ بخار نشان می‌دهد [16].



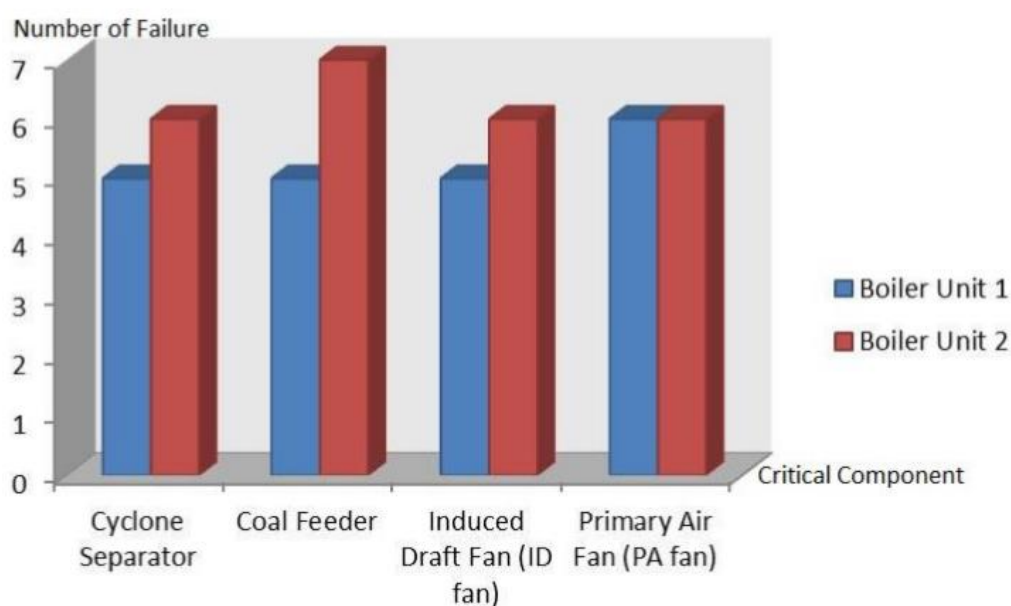
شکل ۱۳ سطح اولویت ریسک (RPN) اجزای حیاتی بویلر [16]

آنالیز ریسک

تحلیل ریسک یکی از منطقی‌ترین روش‌ها برای شناسایی حالت‌های خرابی در نیروگاه بخار به‌ویژه در بخش بویلر می‌باشد. تحلیل ریسک با استفاده از FMEA رویکردی برای اولویت‌بندی ریسک بالقوه با توجه به علل شکست است. در این تحلیل ریسک، دیگ دارای شانزده قطعه است که اغلب با خرابی یا آسیب مواجه می‌شوند و حداقل ۴ جزء وجود دارد که بالاترین مقدار عدد اولویت ریسک (RPN) را دارند به طوری که می‌توان آنها را به عنوان جزء بحرانی طبقه‌بندی کرد. بالاترین مقدار RPN روی یک جداکننده سیکلون با ۳۳۶ RPN بدست آمده است. سایر بالاترین RPN ها، فن هوای اولیه (پنکه PA)، تغذیه زغال سنگ و فن القایی (فن ID) با مقادیر RPN ۳۲۴، ۲۹۴ و ۲۸۰ هستند. توصیه‌هایی را می‌توان برای کاهش خطر آسیب به اجزای بویلر اعمال کرد، از جمله استفاده از روش‌های تشخیصی، انجام کنترل‌های پیشگیرانه، استفاده از تکنیک‌های مدیریت بصری، استفاده از نگهداری پیشگیرانه برای توسعه آنها به سمت شبیه‌سازی برای پیش بینی خرابی یا آسیب، استفاده از حسگرها برای تشخیص خرابی‌ها، و توسعه روش‌های بازرسی برای شناسایی خرابی‌های غیرمنتظره در تجهیزات خاص [16].

ارزیابی و محاسبات قابلیت اطمینان

محاسبه قابلیت اطمینان بر روی چهار جزء مهم برای دو بویلر مجزا انجام می‌شود. چهار جزء حیاتی عبارتند از جداکننده سیکلون، فن هوای اولیه (پنکه PA)، تغذیه کننده زغال سنگ و فن القایی (فن ID). داده‌های خرابی استفاده شده برای بازه زمانی مارس ۲۰۱۵ تا اوت ۲۰۱۵ (شش ماه) می‌باشد. تعداد خرابی‌ها برای هر جزء مهم را می‌توان در شکل (۱۴) مشاهده کرد.



شکل ۱۴ تعداد خرابی اجزاء حیاتی دیگر بخار [16]

اولین مرحله برای محاسبه قابلیت اطمینان، آزمایش توزیع (شاخص برازش) و تعیین پارامتر (خوب بودن برازش) است که برای زمان خرابی (TTF) و زمان تعمیر (TTR) هر جزء مهم در دستگاه انجام می‌شود. محاسبات با استفاده از برنامه Minitab 16 انجام شده است. توزیع انتخاب شده از دو روش ارزیابی، یعنی اندرسون دارلینگ (AD^{29}) و ضریب همبستگی پیرسون^{۳۰} استفاده خواهد کرد. در حالی که پارامترها بر اساس توزیعی که قبلاً انتخاب شده است تعیین می‌شوند. خلاصه آزمایش‌های توزیع و پارامترها برای زمان تا خرابی (TTF) و زمان تعمیر (TTR) برای هر جزء حیاتی دیگر با استفاده از برنامه Minitab 16، در جدول (۱۱) و جدول (۱۲) قابل مشاهده است [16].

²⁹ Anderson Darling

³⁰ Pearson correlation coefficient

جدول ۱۱ خلاصه آزمایش توزیع و پارامترها برای زمان تا شکست (TTF) [16]

| Boiler | Component | Distribution | Parameter | | | | |
|--------|-------------------|--------------|-----------|---------|----------|---------|----------|
| | | | Weibull | | | Normal | |
| | | | Θ | β | γ | μ | Σ |
| Unit 1 | Cyclone Separator | 3p-Weibull | 369.225 | 0.43689 | 328.300 | - | - |
| | Coal Feeder | 3p-Weibull | 390.156 | 0.36609 | 330.634 | - | - |
| | ID Fan | 3p-Weibull | 263.237 | 0.28650 | 333.260 | - | - |
| | PA Fan | 3p-Weibull | 467.616 | 0.71195 | 285.961 | - | - |
| Unit 2 | Cyclone Separator | Normal | - | - | - | 694.402 | 364.251 |
| | Coal Feeder | 3p-Weibull | 338.177 | 0.66965 | 321.707 | - | - |
| | ID Fan | 3p-Weibull | 487.349 | 0.64880 | 311.411 | - | - |
| | PA Fan | 3p-Weibull | 161.367 | 0.20106 | 334.064 | - | - |

جدول ۱۲ خلاصه آزمایش توزیع و پارامترها برای زمان تعمیر (TTR) [16]

| Boiler | Component | Distribution | Parameter | | |
|--------|-------------------|--------------|-----------|---------|----------|
| | | | Weibull | | |
| | | | θ | β | Γ |
| Unit 1 | Cyclone Separator | 3p-Weibull | 0.86862 | 0.39684 | 1.01595 |
| | Coal Feeder | 3p-Weibull | 0.96547 | 1.61950 | 0.97137 |
| | ID Fan | 3p-Weibull | 0.73507 | 0.64297 | 1.08582 |
| | PA Fan | 3p-Weibull | 0.81565 | 1.42279 | 0.89147 |
| Unit 2 | Cyclone Separator | 3p-Weibull | 0.36030 | 0.58583 | 1.11122 |
| | Coal Feeder | 3p-Weibull | 0.34437 | 1.17905 | 1.27532 |
| | ID Fan | 3p-Weibull | 0.51155 | 0.62316 | 1.36482 |
| | PA Fan | 3p-Weibull | 0.43569 | 0.85299 | 1.23573 |

پس از اینکه توزیع و پارامترهای زمان تا خرابی (TTF) و زمان تعمیر (TTR) برای هر جزء حیاتی بویلر به دست آمد، مرحله بعدی تعیین میانگین زمان خرابی (MTTF)، میانگین زمان تعمیر (MTTR) و قابلیت اطمینان، می‌باشد. نمونه‌هایی از محاسبات MTTF برای یونیت جداکننده سیکلون اول، به شرح زیر است [16]:

$$MTTF = \gamma + \theta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

$$\begin{aligned}
 MTTF &= 328.300 + 369.225 \times \Gamma \left(1 + \frac{1}{0.43689} \right) \\
 &= 328.300 + 369.225 \times \Gamma(3.29) \\
 &= 328.300 + 369.225 \times 1.97565 = 1,057.76 \text{ hours}
 \end{aligned}$$

نمونه‌هایی از محاسبات قابلیت اطمینان برای واحد جداکننده سیکلون (۱) به شرح زیر است:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{1,057.76 - 328.300}{369.225} \right)^{0.43689} \right] = 0.4218 = 42.18\%$$

خلاصه محاسبات حاصل از MTTF، MTTR و قابلیت اطمینان اجزای حیاتی بویلر در جدول (۱۳) قابل مشاهده است:

جدول ۱۳ خلاصه نتایج محاسبات از MTTF، MTTR و قابلیت اطمینان اجزاء حیاتی بویلر [16]

| Boiler | Component | MTTF (Hours) | Reliability | MTTR (Hours) | Reliability |
|--------|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Unit 1 | Cyclone Separator | 1,057.76 | 42.18% | 2.95 | 41.39% |
| | Coal Feeder | 1,292.40 | 40.56% | 1.84 | 23.43% |
| | ID Fan | 1,238.91 | 37.32% | 2.11 | 40.97% |
| | PA Fan | 866.82 | 41.30% | 1.63 | 27.45% |
| Unit 2 | Cyclone Separator | 694.40 | 50.00% | 1.67 | 40.16% |
| | Coal Feeder | 805.17 | 38.39% | 1.60 | 32.79% |
| | ID Fan | 978.00 | 41.17% | 2.10 | 41.03% |
| | PA Fan | 1,260.74 | 31.52% | 1.71 | 39.66% |

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان

پس از محاسبه قابلیت اطمینان چهار جزء حیاتی، یعنی جداکننده سیکلون، فن هوای اولیه (پنکه PA)، تغذیه کننده زغال سنگ و فن القایی (فن ID)، میانگین مقدار قابلیت اطمینان به دست آمده زیر پنجاه درصد و پایین می‌باشد. نتایج محاسبه میانگین زمان خرابی (MTTF)، نشان می‌دهد که بازه تعمیرات و نگهداری بین ۶۹۴ ساعت تا ۱۲۹۲ ساعت با قابلیت اطمینان ۳۱ تا ۵۰ درصد است. در حالی که نتایج محاسبه میانگین زمان تعمیر (MTTR) نشان داد که فاصله تعمیرات ۱.۶ ساعت تا ۲.۹۵ ساعت با قابلیت اطمینان ۲۳ تا ۴۱ درصد است. قابلیت اطمینان پایین این دیگ بخار، ناشی از سیستم تعمیر و نگهداری است که توسط این

مجموعه اجرا شده است که هنوز از تعمیر و نگهداری اصلاحی^{۳۱} استفاده می‌کنند. علاوه بر این، قابلیت اطمینان دستگاه نیز تحت تأثیر مدت زمان استفاده قرار می‌گیرد، هر چه عمر طولانی‌تر باشد آسیب و خرابی بیشتری رخ می‌دهد، در نتیجه قابلیت اطمینان نیز کمتر می‌گردد. برای افزایش قابلیت اطمینان، می‌توان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه^{۳۲} را انجام داد تا زمان نگهداری به خوبی برنامه‌ریزی شود. تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی شده همچنین از قطعی‌های غیرمنتظره در سیستم جلوگیری می‌کند [16].

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله دوم

نتیجه‌گیری نتایج ارزیابی ریسک اجزای حیاتی بویلر با استفاده از تحلیل حالت خرابی و اثر (FMEA)، بیشترین ریسک را در چهار جزء حیاتی جداکننده سیکلون، فن هوای اولیه (PA fan)، تغذیه زغال سنگ و فن القایی نشان می‌دهد. در حالی که نتایج محاسبات قابلیت اطمینان از چهار مؤلفه، میانگین مقدار قابلیت اطمینان به‌دست‌آمده زیر ۵۰ درصد و پایین می‌باشد. نتایج تجزیه و تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان که برای حداقل رساندن ریسک و بهبود قابلیت اطمینان اجزای حیاتی دیگر با استفاده از روش‌های تشخیصی، انجام کنترل‌های پیشگیرانه، استفاده از تکنیک‌های مدیریت بصری، استفاده از حسگرها برای تشخیص خرابی‌ها و انجام تعمیرات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی شده برای پیشگیری توصیه می‌کند تا از قطعی غیرمنتظره در سیستم تولید جلوگیری به عمل آید.

بخش دوم: معرفی و بررسی چند مقاله بطور خلاصه در زمینه قابلیت اطمینان بویلرها در صنایع مختلف و روش‌شناسی آنها

مقاله سوم

این مطالعه در کشور هند توسط هانومانانت جگتاپ (Hanumant Jagtap) و همکاران در سال ۲۰۲۰ مورد پژوهش قرار گرفته است که به بررسی قابلیت اطمینان بویلرها در فرآیندهای نیروگاه بخار پرداخته است [17].

روش تحقیق در این مقاله

در این مطالعه از روش زنجیره مارکوف استفاده شده است که نسبت به دو مقاله قبلی از نظر روش تحقیق، متفاوت می‌باشد و در ادامه بطور خلاصه به بیان برخی از نکات در این مطالعه می‌پردازیم تا با این روش بیشتر آشنا شویم.

روش‌های بهینه‌سازی مدرن مانند الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی کلنی مورچه‌ها، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی توسط محققین قبلی برای کاربردهای مختلف توسعه و اتخاذ شده‌اند. روش بهینه‌سازی

³¹ Corrective maintenance

³² Preventive maintenance

ازدحام ذرات (PSO^{33}) مزیتی نسبت به روش‌های بهینه‌سازی دیگر دارد زیرا، PSO تحت تأثیر اندازه و غیرخطی بودن مسئله نیست و یک روش محاسباتی تکاملی می‌باشد.

استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب برای حفظ اطمینان نیروگاه حرارتی بسیار ضروری است. نیروگاه حرارتی یک سیستم پیچیده است که از زیرسیستم‌های مختلفی تشکیل شده است که به صورت سری یا موازی به هم متصل شده‌اند. سیستم بویلر-کوره (BF) یکی از حیاتی‌ترین زیرسیستم‌های نیروگاه حرارتی است. این مقاله مدل‌سازی و شبیه‌سازی مبتنی بر در دسترس بودن سیستم دیگ-کوره نیروگاه حرارتی با ظرفیت (۵۰۰ مگاوات) را ارائه می‌کند. مدل شبیه‌سازی مبتنی بر مارکوف سیستم برای تجزیه و تحلیل عملکرد توسعه یافته است. معادلات دیفرانسیل از یک نمودار انتقال نشان دهنده حالت‌های مختلف با ظرفیت کاری کامل، ظرفیت کاهش یافته و حالت شکست، مشتق شده است. برای حل معادلات دیفرانسیل از شرط نرمال سازی استفاده می‌شود. بر اساس رتبه‌بندی اجزاء بحرانی، اولویت‌های نگهداری برای سیستم در نظر گرفته شده است. در دسترس بودن سیستم بویلر-کوره با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات با تغییر تعداد ذرات، بهینه شده است. نتایج مطالعه نشان داد که حداکثر سطح در دسترس بودن سیستم ۹۹.۹۸۴۵٪ می‌باشد. علاوه بر این، پارامترهای نرخ شکست بهینه و نرخ تعمیر زیرسیستم‌ها برای پیشنهاد یک استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب برای سیستم بویلر-کوره کارخانه استفاده می‌شود. یافته‌های این مطالعه به تصمیم گیرندگان در برنامه‌ریزی فعالیت تعمیر و نگهداری بر اساس سطح بحرانی زیرسیستم‌ها برای تخصیص منابع کمک می‌نماید. تقاضای زیاد برای الکتریسیته اهمیت حفظ منابع تولید برق را در اولویت بالاتری در هند به ارمغان آورده است. در میان منابع مختلف، نیروگاه حرارتی منبع اصلی تولید برق می‌باشد که حفظ نیروگاه حرارتی به طور مداوم در حالت عملیاتی ضروری است [17].

حالات زیر در این مطالعه در نظر گرفته شده است:

(a) زیرسیستم درام بویلر "A" از یک واحد تشکیل شده است که خرابی درام دیگ منجر به خرابی کل واحد می‌شود.

(b) زیر سیستم لوله‌های دیگ بخار "B" از یک واحد تشکیل شده است که خرابی لوله‌های دیگ منجر به خرابی کل واحد می‌شود.

(c) زیر سیستم احتراق سوخت "C" از یک واحد تشکیل شده است که خرابی سیستم احتراق سوخت منجر به خرابی کل واحد می‌شود.

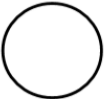


(d) زیر سیستم سوپرهیتر "D" از یک واحد تشکیل شده است که خرابی سوپرهیتر منجر به کارکرد سیستم با ظرفیت کم می‌شود.

³³ Particle swarm optimization

(e) زیر سیستم اکونومایزر "E" از یک واحد تشکیل شده است که خرابی اکونومایزر منجر به کارکرد سیستم با ظرفیت کم می شود.

(f) زیرسیستم گرم کن "F" از یک واحد تشکیل شده است که خرابی گرم کن مجدد منجر به کارکرد سیستم با ظرفیت کم می شود.

نمادهای مورد استفاده در این مقاله به صورت زیر هستند:

 : Good capacity state  : Reduced capacity state
 : Failed state

A, B, C, D, E, F : Equipment are in good operating state

a, b, c, d, e, f, g, h : Indicates the failed state of A, B, C, D, E, F

DEF : Indicates reduced capacity state of D, E and F

λ_i : Mean constant failure rate

μ_i : Mean constant repair

$P_i(t)$: Probability that at time 't' the system is in ith state.

' : Derivatives with respect to 't'

رسم نمودار مارکوف و معادلات

در این تحقیق میزان خرابی و میزان تعمیر سیستم از تاریخچه نگهداری نیروگاه گرفته شده است. مدل شبیه سازی در دسترس بودن برای این سیستم بر اساس رویکرد مارکوف توسعه داده شده است. عبارات جدید ریاضی با استفاده از روش تبدیل لاپلاس بدست آمده اند. ماتریس در دسترس بودن برای نشان دادن عملکرد سیستم تشکیل شده است. شکل (۱۵) نمودار انتقال سیستم را با سه حالت مختلف نشان می دهد، کار با ظرفیت کامل، ظرفیت کاهش یافته و وضعیت شکست. این طرح شامل ۴۴ حالت ('۰' تا '۴۳') است که از این میان حالت '۰' نشان دهنده زیرسیستم کار با ظرفیت کامل، حالت های '۱' تا '۷' نشان دهنده زیرسیستم کار با ظرفیت کاهش یافته و '۸' تا '۴۳' زیر سیستم را در وضعیت شکست را نشان می دهد [17].

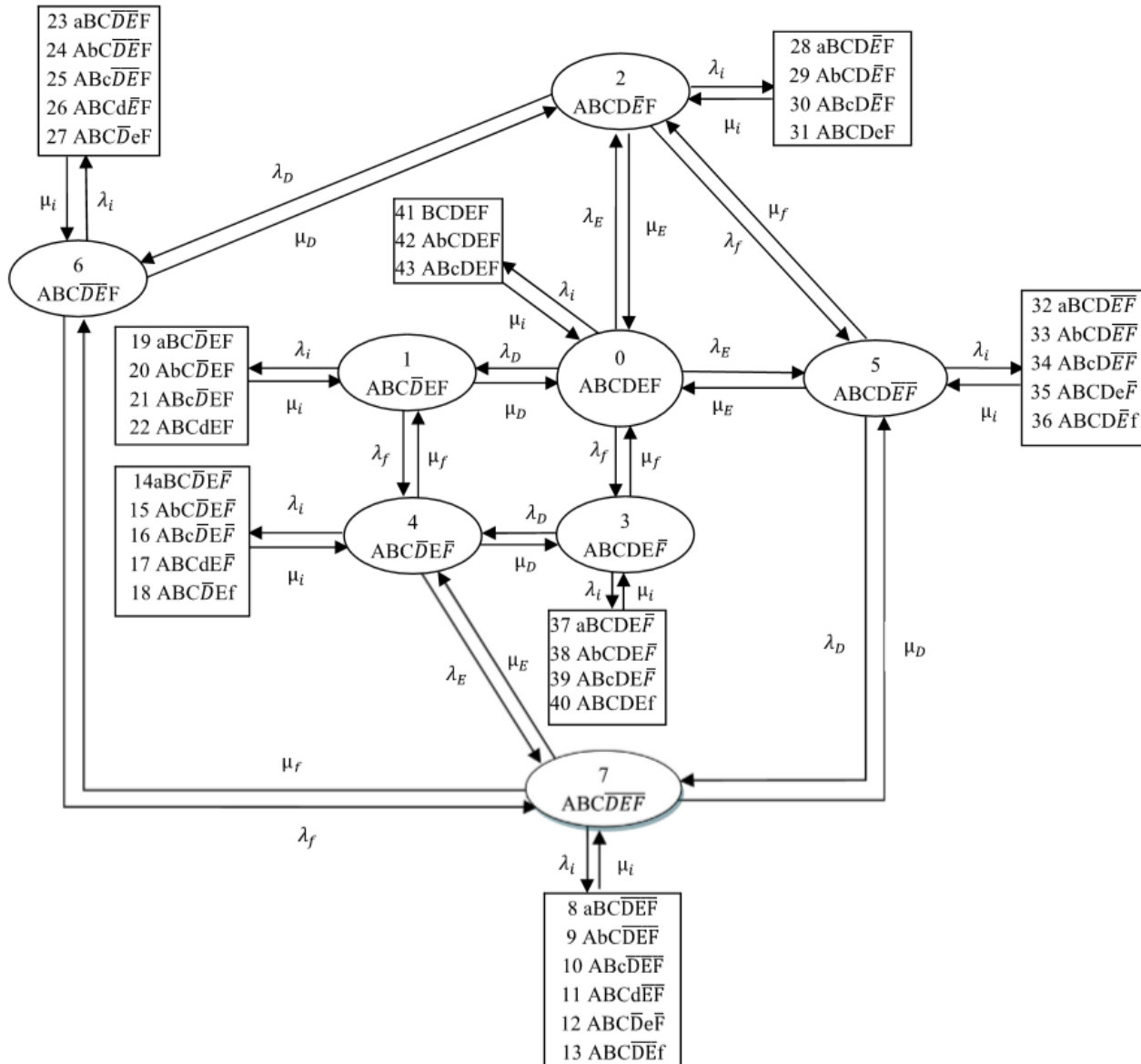
در این مطالعه، یک نمودار حالت گذار بر اساس مدل مارکوف بر اساس مفروضات زیر در شکل (۱۵) توسعه داده شده است.

(الف) میزان خرابی و نرخ تعمیر هر سیستم ثابت و از نظر استاتیک مستقل است.

(ب) بیش از یک سیستم در یک زمان خراب نمی شود.

(ج) سیستم تعمیر شده مانند یک سیستم جدید است.

(د) واحدهای آماده به کار دارای ظرفیت یکسانی هستند.



شکل ۱۵ نمودار انتقال سیستم/این بویلر (زنجیره مارکوف) [17]

همچنین در این مطالعه بطور مفصل و کامل معادلات و روابط ریاضی مورد استفاده در تعیین قابلیت اطمینان سیستم و اجزاء بیان شده است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله سوم

در این مطالعه، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بر اساس اهمیت تجهیزات می‌باشد و فراوانی خرابی‌های سیستم، انتخاب میزان تخصیص منابع نگهداری را تسهیل و مشخص می‌کند. همچنین زمان تعمیر موردنیاز سیستم به برنامه‌ریزی فعالیت تعمیر و نگهداری کمک می‌کند. به منظور بهبود برنامه‌ریزی نگهداری سیستم BF^{34} ، این مطالعه اولویت‌بندی سیستم را بر اساس سطح بحرانی توصیه می‌کند که به نوبه خود به فرد مسئول تعمیر و نگهداری کمک می‌کند. به منظور ارزیابی اثر نرخ شکست و نرخ تعمیر بر در دسترس بودن یک سیستم BF نیروگاه حرارتی، یک مدل شبیه‌سازی در دسترس بودن بر اساس رویکرد مارکوف برای ارزیابی عملکرد توسعه یافته و در مطالعه حاضر گزارش شده است. ماتریس‌های در دسترس بودن بر اساس مدل احتمالی مارکوف توسعه یافته‌اند. برای این کار، عملکرد تجهیزات انتخابی دیگ بخار برای مقادیر شناخته شده نرخ شکست (λ) و نرخ تعمیر (μ)، ارزیابی می‌شود. اثر افزایش نرخ خرابی باعث کاهش دسترس بودن سیستم می‌شود. علاوه بر این، با افزایش نرخ تعمیر، در دسترس بودن سیستم تا حد مجاز افزایش یافته است. بنابراین نتایج بدست آمده از رویکرد مارکوف بر اساس رویکرد احتمالی، قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. مقادیر بهینه برای ترکیب‌های احتمالی عدم موفقیت و تعمیرات به دست می‌آیند و اولویت تعمیر و نگهداری براساس سطح بحرانی تعیین می‌شود. نتایج مبتنی بر مارکوف نشان داد که درام دیگ بخار، یکی از بحرانی‌ترین تجهیزات می‌باشد، زیرا تأثیر میزان خرابی و نرخ تعمیر آن بر در دسترس بودن واحد در مقایسه با سایر سیستم‌های سیستم BF، بیشتر می‌باشد. بنابراین، در دسترس بودن یک درام دیگ بخار که نیاز به توجه بالایی از نظر تعمیر و نگهداری دارد. در نهایت، نتایج این مطالعه با استفاده از روش PSO، از بهینه‌سازی نگهداری پیشگیرانه و پیشگیری از خرابی حمایت می‌کند [17].

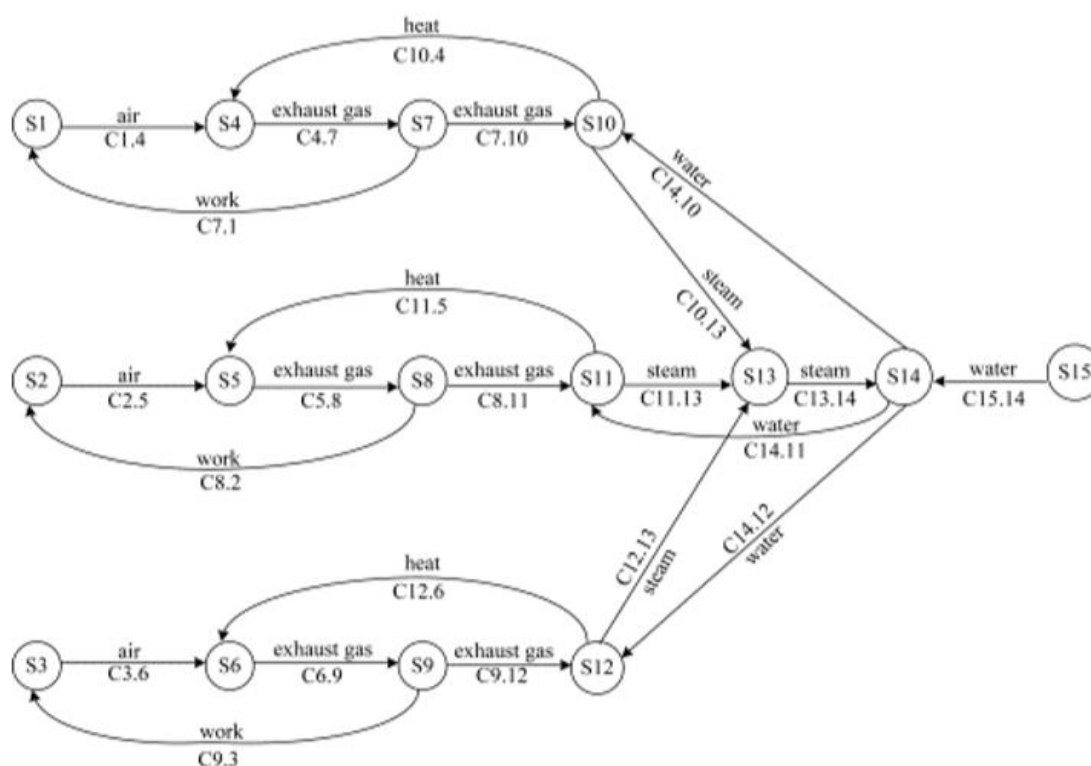
³⁴ Boiler- furnace

مقاله چهارم

این مطالعه در کشور اندونزی توسط آنیندا ماهارانی (Aninda Maharani) و همکاران در سال ۲۰۱۷ مورد پژوهش قرار گرفته است که به بررسی قابلیت اطمینان بویلرها در فرآیندهای نیروگاه ترکیبی پرداخته است [18].

روش تحقیق در این مقاله

این مطالعه از روش تئوری گراف استفاده کرده است. یکی از راه‌حل‌های ساده‌سازی پیچیدگی‌های مدل قابلیت اطمینان، نظریه گراف است، زیرا این روش یک رویکرد تحلیلی است که منجر به ساده‌سازی چنین سیستم عظیمی می‌شود. نظریه گراف، مطالعه گرافی است که از ساختار ریاضی برای ایجاد مدلی از رابطه زوجی بین اشیاء استفاده می‌کند. به عنوان مثال شکل (۱۶) یکی از گراف‌های ترسیم شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد که اطلاعات تکمیلی و نتایج این پژوهش، در این مقاله قرار دارند و هدف این بخش از پروژه، فقط معرفی مختصر این مقاله بوده است [18].



شکل ۱۶ یکی از گراف‌های رسم شده در این مقاله [18]

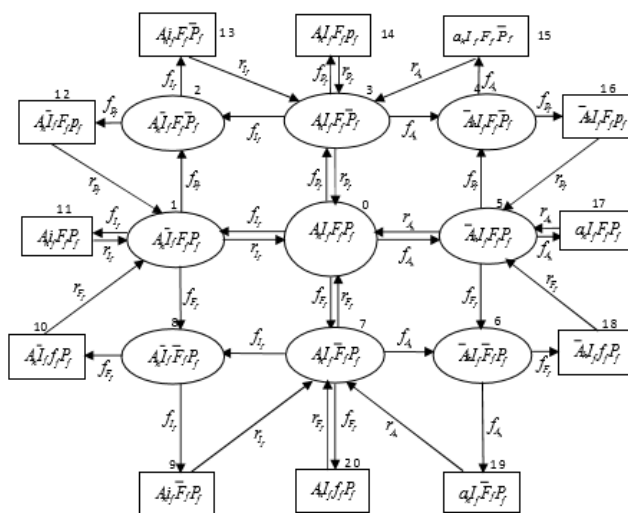
مقاله پنجم

این مطالعه در کشور هند توسط راویندر کومار (Ravinder Kumar) در سال ۲۰۱۴ مورد پژوهش قرار گرفته است که به بررسی قابلیت اطمینان سیستم چرخش هوای بویلر در نیروگاه حرارتی پرداخته است [19].

روش تحقیق در این مقاله

این مطالعه بر اساس روش فرآیند مارکوف تولد-مرگ^{۳۵} توسعه پیدا کرده است که فرآیند تولد-مرگ (فرآیند تولد و مرگ) یک مورد خاص از فرآیند مارکوف زمان پیوسته است که در آن انتقال حالت تنها دو نوع است: "تولدها" که متغیر حالت را یک مرتبه افزایش می‌دهند و "مرگ‌ها" که متغیر حالت را یک مرتبه کاهش می‌دهند. به عنوان مثال شکل (۱۷) یکی از مارکوف‌های ترسیم شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد که اطلاعات تکمیلی و نتایج این پژوهش، در این مقاله قرار دارند و هدف این بخش از پروژه، فقط معرفی مختصر این مقاله بوده است [19].

○ : Good capacity state ○ : Reduced capacity state □ : Failed state
 P_f, F_f, A_h, I_f : Subsystems are in good operating state
 p_f, f_f, a_h, i_f : Indicates the failed state of P_f, F_f, A_h, I_f
 $\bar{P}_f, \bar{F}_f, \bar{A}_h, \bar{I}_f$: Subsystems P_f, F_f, A_h, I_f are in reduced capacity state
 $f_{P_f}, f_{F_f}, f_{A_h}, f_{I_f}$: Mean constant failure rates from states $P_f, F_f, A_h, I_f, \bar{P}_f, \bar{F}_f, \bar{A}_h, \bar{I}_f$ to the states $\bar{P}_f, \bar{F}_f, \bar{A}_h, \bar{I}_f, p_f, f_f, a_h, i_f$
 $r_{P_f}, r_{F_f}, r_{A_h}, r_{I_f}$: Mean constant repair rates from states $\bar{P}_f, \bar{F}_f, \bar{A}_h, \bar{I}_f, p_f, f_f, a_h, i_f$ to the states $P_f, F_f, A_h, I_f, \bar{P}_f, \bar{F}_f, \bar{A}_h, \bar{I}_f$
 $P_i(t)$: Probability that at time 't' the system is in i^{th} state.
 $'$: Derivative w.r.t. 't'



شکل ۱۷ نمودار مارکوف ترسیم شده برای سیستم چرخش هوا در بویلر در این مقاله [19]

³⁵ Markov Birth-Death process

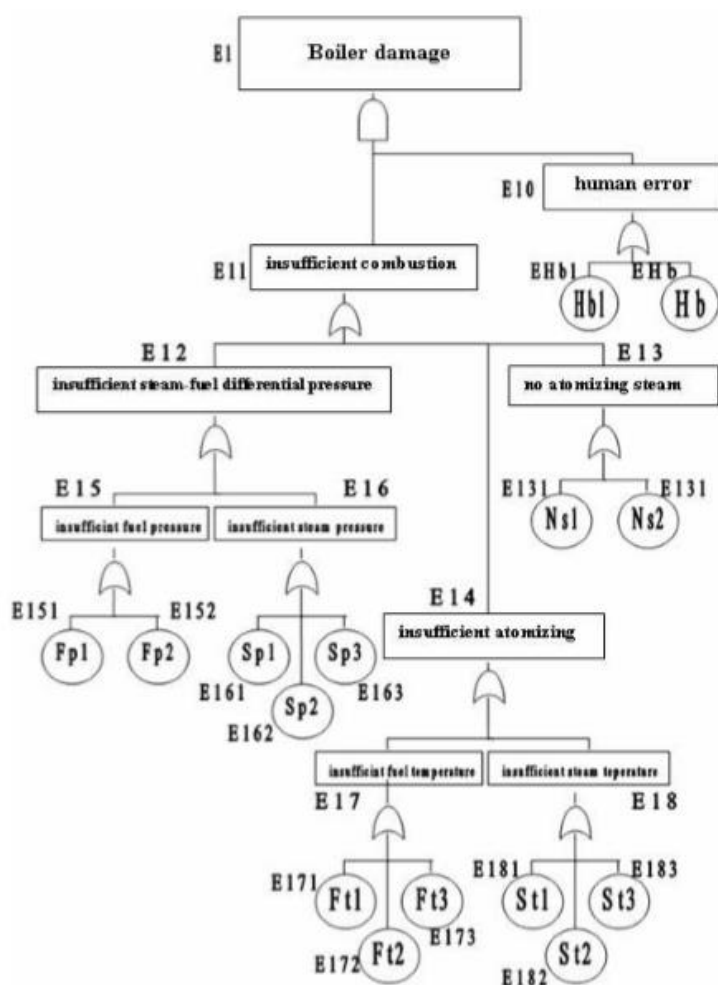
مقاله ششم

این مطالعه توسط فیک لطیف صالح (Faik Lateef Saleh) و همکاران در سال ۲۰۱۲ مورد پژوهش قرار گرفته است که به بررسی قابلیت اطمینان بویلرها در فرآیندهای تصفیه بنزین پرداخته است [20].

روش تحقیق در این مقاله

این مطالعه با استفاده از روش درخت خطا (FAULT TREE ANALYSIS) به بررسی قابلیت اطمینان بویلرها در فرآیندهای تصفیه بنزین پرداخته است و علت معرفی این مقاله با توجه به اینکه موضوع آن ارتباطی به صنایع غذایی یا حتی نیروگاه‌های بخار ندارد، این است که از یک روش کاملاً متفاوت برای انجام این کار استفاده شده است که آشنایی با روش آن هم می‌تواند مفید فایده باشد.

به عنوان مثال شکل (۱۸) یکی از درخت‌های خطا ترسیم شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد که اطلاعات تکمیلی و نتایج این پژوهش، در این مقاله قرار دارند و هدف این بخش از پروژه، فقط معرفی مختصر این مقاله بوده است [20].



شکل ۱۸ یکی از درخت‌های خطا رسم شده در این مقاله [20]

جمع بندی

در ابتدای این پژوهش به بررسی کاربردهای سیستم‌های بخار در صنایع غذایی و فناوری این سیستم‌ها و نیز انواع آنها پرداخته شده است و اشاره شده است که این سیستم‌ها در صنایع کیک و شکلات، لبنیات، سس و رب گوجه‌فرنگی و قند و ... از اجزاء حیاتی می‌باشند که در فرآیندهایی مانند استریل و ضدعفونی کردن، کاهش خطرات میکروبیولوژیکی، پخت و پز، خشک کردن و گرمایش تاسیسات ایفای نقش دارند. از انواع متداول آنها به دو نوع واتر تیوب و فایر تیوب می‌توان اشاره نمود که دیگ‌های واتر تیوب در مکان‌هایی استفاده می‌شوند که فشار بخار بالایی نیاز می‌باشد، زیرا می‌توانند فشار داخلی بالاتری را نسبت به پوسته‌های محفظه‌ای در نوع فایر تیوب تحمل نمایند.

در ادامه، این پژوهش به بررسی چند مقاله در زمینه مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های بخار پرداخته است و انواع روش‌های این مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند که روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده شده در این مطالعات عبارت‌اند از: روش استفاده از نظر متخصصان (Expert judgment method)، زنجیره مارکوف، تئوری گراف و درخت خطا (Fault Tree) و برخی دیگر از روش‌ها. به طور کلی، این تجزیه و تحلیل همچنین نشان می‌دهد که TTR برای سیستم احتراق طولانی‌تر از زیر سیستم‌های دیگر است. بنابراین، برای کاهش زمان‌های لازم برای تعمیر سیستم احتراق و افزایش در دسترس بودن بویلر، روش‌های تعمیر و نگهداری مداوم برای سیستم احتراق، ضروری می‌باشد. این تجزیه و تحلیل همچنین نشان می‌دهد که سیستم احتراق، سیستم تغذیه آب، جداکننده سیکلون، فن هوای اولیه (PA fan)، تغذیه زغال سنگ، فن القایی و برخی دیگر از تجهیزات، دلایل اصلی خرابی دیگ‌های بخار هستند، قطعاتی مانند مخزن تغذیه آب، پمپ تغذیه آب، سنسور دمای تغذیه آب، صافی، سنسور دمای آب برگشتی، فیلتر میعانات و گردگیر مکانیکی گرد و غبار، قابلیت اطمینان پایینی دارند. در نهایت این نتیجه حاصل شده است که انجام تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، در افزایش قابلیت اطمینان دیگ‌های بخار بسیار موثر و حائز اهمیت می‌باشد، در حالی که انجام تعمیرات اصلاحی تاثیر کمتری دارد.

- [1] <https://industrialboiler.co/steam-boiler-in-food-processing-applications/>
- [2] <https://www.mboiler.com/>
- [3] فرهنگی زهره، بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت شیر، وزارت نیرو-سازمان بهره‌وری انرژی ایران، ۱۳۸۳
- [4] <https://www.tek-trol.com/industry-markets/dairy-industry/>
- [5] <https://www.linquip.com/blog/steam-boilers-ultimate-guide>
- [6] <https://industrialboiler.com/>
- [7] <https://miuraboiler.com/steam-boiler-guide-for-food-beverage-processing>
- [8] <https://www.thermodyneboilers.com/food-processing-industry-boiler>
- [9] <http://www.boilers.guide/key-components-of-boilers/>
- [10] Suyog S. Patil, Anand K. Bewoor, Rajkumar B. Patil, Availability Analysis of a Steam Boiler in Textile Process Industries Using Failure and Repair Data: A Case Study, The ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, 2021, <https://doi.org/10.1115/1.4049007>
- [11] Ascher, H. E., and Feingold, H., Repairable System Reliability: Modeling, Interface, Misconception and Their Causes, Marcel Dekker, New York, 1984.
- [12] Louit, D. M., Pascual, R., and Jardine, A. K. S., 2009, “A Practical Procedure for the Selection of Time-to-Failure Models Based on the Assessment of Trends in Maintenance Data,” Reliab. Eng. Syst. Saf., 94(10), pp. 1618–1628.
- [13] Patil, S. S., and Bewoor, A. K., 2020, “Reliability Analysis of a Steam Boiler System by Expert Judgment Method and Best Fit Failure Model Method: A New Approach,” Int. J. Qual. Reliab. Manage., epub.
- [14] Patil, R. B., Kothavale, B. S., and Waghmode, L. Y., 2019, “Selection of Timeto-Failure Model for Computerized Numerical Control Turning Center Based on the Assessment of Trends in Maintenance Data,” Proc. Inst. Mech. Eng., Part O, 233(2), pp. 105–117.
- [15] Patil, R. B., Kothavale, B. S., Waghmode, L. Y., and Pecht, M., 2019, “Life Cycle Cost Analysis of a Computerized Numerical Control Machine Tool: A Case Study From Indian Manufacturing Industry,” J. Qual. Maint. Eng., epub.

- [16] I Pamungkas, HT Irawan, Fitriadi, A Saputra, Risk and reliability analysis on critical components of boiler in steam power plant, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, DOI:[10.1088/1757-899X/1003/1/012048](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1003/1/012048)
- [17] Hanumant Jagtap, Anand Bewoor, Ravinder Kumar, MohammadHossein Ahmadi, Giulio Lorenzini, Markov-based performance evaluation andavailability optimization of the boiler–furnace system in coal-fired thermal power plant using PSO, Energy Reports, 2020, doi: [10.1016/j.egyr.2020.04.028](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.028)
- [18] Aninda Maharani, Isti Surjandari, Amar Rachman, Reliability Index Analysis of Gas and Steam Power Plant using Graph Theory, 2017, DOI:[10.1109/ICSITech.2017.8257116](https://doi.org/10.1109/ICSITech.2017.8257116)
- [19] Ravinder Kumar, Availability analysis of thermal power plant boiler air circulation system using Markov approach, Decision Science Letters, 2014, DOI:[10.5267/j.dsl.2013.08.001](https://doi.org/10.5267/j.dsl.2013.08.001)
- [20] Faik Lateef Saleh, Ouf Abdulrahman Shams, Asmaa AliHussein, studying boiler reliability in a petroleum refinery by using fault tree analysis, 2012
- [21] R. Stanley, F. Pedrosa, Spirax Sarco, Managing steam quality in food and beverage processing, Hygienic Design of Food Factories ,Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2011, <https://doi.org/10.1533/9780857094933.4.557>