

## طراحی قابلیت اطمینان-محور، نمونه موردی بویلر بازیاب (HRSG)

محمدجواد شمسی

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران m.j.shamsi66@gmail.com

محمود شهرخی\*

(نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران shahrokhi292@yahoo.com

**چکیده:** استفاده از بویلرهای بازیاب در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بازدهی تولید برق را به نحو چشمگیری افزایش می‌دهد. یکی از بخش‌های پراهمیت بویلرهای بازیاب سیستم تغذیه آب آن‌ها است. این مقاله به تشریح روند انتخاب پیکربندی بهینه سیستم تغذیه آب بویلرهای بازیاب (HRSG) می‌پردازد که در شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مینا انجام شده است. نخست تجهیزات مهم سیستم تغذیه آب به کمک نقشه‌های فرآیند و ابزار دقیق شناسایی و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان آن‌ها ترسیم شده‌اند. سپس آهنگ خرابی هر یک از تجهیزات با استفاده از مستندات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، هندبوک OREDA و استاندارد IEEE 500 برآورد شده و قابلیت اطمینان سیستم در محیط نرم‌افزار Excel محاسبه شده است. در پایان نیز نتایج تحلیل شده و بر مبنای آن پیکربندی بهینه سیستم تغذیه آب تعیین شد. رویکرد پیشنهادی می‌تواند برای طراحی قابلیت اطمینان-محور سایر سیستم‌های صنعتی نیز به کار رود.

**واژگان کلیدی:** بویلرهای HRSG، سیستم تغذیه آب، مدل دیاگرام بلوکی، قابلیت اطمینان، شکست، افزونگی

### ۱- مقدمه

اطمینان اجزای تشکیل‌دهنده آن و ارتباطات بین این اجزاء محاسبه می‌شود. در گذشته تا حدی این مدل جهت ارزیابی قابلیت اطمینان در کشور محدود بوده و این مطالعه یکی از محدود پژوهش‌های عملی در این زمینه می‌باشد. این مقاله، طراحی قابلیت اطمینان بویلرهای نیروگاهی با استفاده از بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان را تشریح می‌کند. بویلر<sup>۲</sup> مخزنی بسته است که در آن آب و سیالات دیگر حرارت داده می‌شود تا سیال با دمای بالا و یا بخار تولید شود که عمده‌ترین کاربردهای آن در گرمایش مرکزی<sup>۳</sup>، نیروگاه‌های تولید برق<sup>۴</sup>، پخت‌وپز و ضدعفونی است.

در بویلرهای بازیاب حرارت و مولد بخار (HRSG<sup>۵</sup>) از مشعل برای گرم کردن سیال استفاده نمی‌شود، بلکه نوعی مبدل

از کار افتادن سیستم‌های حساس در تأسیسات صنعتی موجب اختلال در سرویس‌دهی آن‌ها شده و باعث ایجاد حوادث و زیان‌های هنگفت می‌شود؛ بنابراین استفاده از روش‌های علمی برای ارزیابی قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری سیستم‌ها و همچنین پیش‌بینی نحوه رفتار آنها امری ضروری و حیاتی است. مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> ابزاری برای نمایش گرافیکی ارتباطات بین اجزای مختلف یک سیستم است که در آن با هر یک از اجزای سیستم به صورت یک بلوک رفتار می‌شود. در این مدل قابلیت اطمینان سیستم بر اساس قابلیت

\* (Corresponding author): shahrokhi292@yahoo.com

<sup>2</sup> Boiler

<sup>3</sup> Central Heating

<sup>4</sup> Power plant

<sup>5</sup> Heat Recovery Steam Generator

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴

دوره ۱۰/ شماره ۳

صفحات ۱۸۹-۲۰۲

<sup>1</sup> Reliability Block Diagram

در این بخش از پژوهش، اجزاء اصلی سیستم تغذیه آب مشخص و در بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان نشان داده شدند. آنگاه آهنگ خرابی و قابلیت اطمینان آن‌ها مشخص شد. سپس، با توجه به سهم خرابی هر یک از این تجهیزات در شکست (خرابی) سیستم تغذیه آب، قابلیت اطمینان کل سیستم محاسبه شد. در پایان، نتایج برای تجزیه و تحلیل و مقایسه پیکربندی‌های پیشنهادی و انتخاب گزینه برتر به کار رفت. سایر بخش‌های مقاله به ترتیب زیر هستند: در بخش ۲ پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه موضوع مقاله توضیح داده می‌شوند، در بخش ۳ مسئله پژوهش با ذکر ساختار اصلی پیکربندی‌های پیشنهادی و اجزای آن‌ها تشریح شده است. در بخش ۴ روش پژوهش و مراحل انجام آن توضیح داده شده‌اند. در این بخش همچنین روابط مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان معرفی شده‌اند. بخش ۵ به یافته‌های پژوهش پرداخته و مقادیر عددی به دست آمده از محاسبات را ارائه می‌کند. در بخش ۶ نتایج پژوهش ارائه شده و پیشنهادات اصلاحی به همراه محورهای برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

## ۲- پیشینه پژوهش

لیسنیاسکی<sup>۱۰</sup> بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD<sup>۱۱</sup>) کلاسیک را برای یک سیستم چندحالتی قابل تعمیر گسترش داد. روش پیشنهادی مبتنی بر فرآیندهای تصادفی ترکیبی و تابع مولد احتمال عام بوده و تعداد حالت‌ها را در مدل چندحالتی به شدت کاهش می‌داد [۱]. جاکولا و ماندلا<sup>۱۲</sup> از بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و تحلیل درخت شکست (FTA<sup>۱۳</sup>) برای ارزیابی قابلیت اطمینان ماشین حمل بار بر اساس نمودار جریان عملکرد استفاده کردند. با کمک این پژوهش، دلایل افت عملکرد دستگاه شناسایی شده و توصیه‌های مناسبی برای بهبود عملکرد پیشنهاد شد [۲]. سوچاستها و پاروتی<sup>۱۴</sup> قابلیت اطمینان مبدل جریان برق<sup>۱۵</sup> را با در نظر گرفتن کیفیت اجزا و تغییر پارامترهای داخلی از نظر آهنگ خرابی<sup>۱۶</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

حرارتی<sup>۱</sup> بازیافت انرژی هستند که حرارت را از یک جریان گاز داغ گرفته و از آن برای تولید بخار استفاده می‌کنند. از بخار تولیدی برای راه‌اندازی یک توربین بخار<sup>۲</sup> در نیروگاه سیکل ترکیبی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. بویلرهای HRSG از قسمت‌های اصلی مختلفی تشکیل شده‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سیستم تغذیه آب<sup>۴</sup>
- سیستم ذخیره تغذیه آب<sup>۵</sup>
- سیستم فشار قوی<sup>۶</sup>
- سیستم فشار ضعیف<sup>۷</sup>
- سیستم میعان‌ساز<sup>۸</sup>
- سیستم متعادل‌سازی مواد شیمیایی<sup>۹</sup>

در این میان سیستم تغذیه آب (FWS) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چرا که خرابی آن به توقف عملکرد بویلر منجر شده و ممکن است به خسارت‌های گسترده‌ای منجر شود.

در راستای انجام مطالعات مهندسی ارزش در شرکت مهندسی ساخت و تجهیزات مینا، پیشنهاد تغییر پیکربندی بویلر (HRSG) مطرح شد. پیکربندی جدید (پیکربندی B) با کم کردن و به اشتراک گذاشتن تجهیزات مازاد (افزونه)، هزینه ساخت بویلر را کاهش می‌دهد، ولی هم‌زمان بررسی اثر آن بر قابلیت اطمینان بویلر نیز ضروری است. در این راستا یک پروژه پژوهشی در قالب تعیین تعداد بهینه تجهیزات پشتیبان و همچنین کاهش تعداد تجهیزات اصلی (به‌خصوص پمپ تغذیه آب با قیمت تقریبی دویست و پنجاه هزار دلار) تعریف شد. در این پروژه، مطالعات زیربنایی در زمینه مدیریت قابلیت اطمینان بویلر با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری آن در سه مرحله طراحی، تأمین و نصب بویلرها آغاز شد. مقاله حاضر بیانگر مطالعه انجام شده با هدف بهینه‌سازی قابلیت اطمینان در فاز طراحی بویلر HRSG است.

<sup>1</sup> Heat Exchanger

<sup>2</sup> Steam Turbine

<sup>3</sup> Combined Cycle

<sup>4</sup> Feed-Water System

<sup>5</sup> Feed-Water Storage System

<sup>6</sup> HP Section

<sup>7</sup> LP Section

<sup>8</sup> Condensate System

<sup>9</sup> Chemical Dosing System

<sup>10</sup> Lisnianski

<sup>11</sup> Reliability Block Diagram

<sup>12</sup> Jakkula & Mandela

<sup>13</sup> Fault Tree Analysis

<sup>14</sup> Sujatha & Parvathy

<sup>15</sup> Luo converter

<sup>16</sup> failure rate

اعداد تصادفی اکسل برای شبیه‌سازی زمان خرابی واحدها یا ماژول‌های فردی در سیستم استفاده می‌شود. خودکارسازی محاسبه قابلیت اطمینان و MTBF در محیط نرم‌افزار Excel امکان بررسی سناریوهای گوناگون را فراهم می‌کند. در ادامه نتایج به دست آمده از این روش مانند برآورد قابلیت اطمینان، میانگین و واریانس خرابی‌ها و فواصل اطمینان مورد بحث قرار گرفت. زمان شبیه‌سازی بستگی به پیچیدگی سیستم، سرعت کامپیوتر و دقت موردنظر داشته و ممکن است از چند دقیقه تا چند ساعت باشد [۶]. اسمولدرس<sup>۷</sup> و همکاران یک مدل تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان از جعبه‌دنده‌های توربین بادی برای بررسی سه پیکربندی متفاوت را ارائه کردند. در این پژوهش برای ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات مهم را در زیرسیستم جعبه‌دنده محصور می‌کنند. بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان تجهیزات جعبه‌دنده نیز با استفاده از نرم‌افزار RRAS<sup>۸</sup> ایجاد شده است. آهنگ خرابی تجهیزات با استفاده از استانداردهای صنعتی و داده‌های موجود از تجهیزات مکانیکی جمع‌آوری و محاسبه شده است. برای بهبود پیش‌بینی قابلیت اطمینان جعبه‌دنده توربین بادی، یک مدل پیش‌بینی پیشرفته مبتنی بر مدهای خرابی و قابلیت حمل بار توسط تجهیزات در شرایط عملیاتی مورد بحث قرار گرفته است [۷]. المتولی<sup>۹</sup> و همکاران مدلی برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، دسترسی پذیری و نگهداری و تعمیرات (RAM<sup>۱۰</sup>) تجهیزات اصلی مولد توربین بادی (WTG<sup>۱۱</sup>) را ارائه کردند. آن‌ها سه مفهوم عملیاتی بر اساس سرعت ژنراتور در نظر گرفتند. تجزیه و تحلیل RAM از زیرمجموعه‌های سیستم شروع شده و سپس زیرسیستم‌ها و سپس سیستم کلی انجام گرفت. با توجه به تأثیر تجهیزات بر تولید انرژی، زیرمجموعه‌ها به عناصر اولیه و فرعی طبقه‌بندی شدند. خرابی در یک عنصر اولیه باعث توقف تولید انرژی شده در حالی که با خرابی در اجزای ثانویه تولید انرژی کاهش پیدا کرد. آن‌ها برای ارزیابی RAM مولد توربین بادی از بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان برای پیکربندی‌های مختلف استفاده کردند. همچنین برای اطلاعات و داده‌های مورد نیاز در مورد آهنگ خرابی و آهنگ تعمیر زیرمجموعه‌های مختلف از پایگاه داده‌های

روش‌های بهبود قابلیت اطمینان اجزای الکترونیکی مورد بحث قرار گرفته و با استفاده از افزونگی، قابلیت اطمینان سیستم بهبود پیدا کرده و از نظر ریاضی نیز این بهبود اثبات شد. در آخر نیز نتایج با استفاده از روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و تجزیه و تحلیل مارکوفی تأیید شد [۳]. وو<sup>۱</sup> و همکاران به منظور بهبود عمر سیستم‌های مکانیکی مانند کمپرسور، آزمایش عمر مخرب پارامتری (ALT<sup>۲</sup>) را به عنوان یک روش قابلیت اطمینان پیشنهاد دادند. این پژوهش شامل ۴ بخش مختلف بود: (۱) طرح ALT پارامتری بر اساس طول عمر، (۲) تجزیه و تحلیل بار برای آزمایش ALT، (۳) یک سری اختصاصی از ALT پارامتری با برنامه‌های اصلاحی، (۴) ارزیابی طراحی کمپرسور نهایی برای اطمینان از طول عمر مفید. برای اعتبارسنجی طرح نیز بخش شیر ورودی در کمپرسور رفت و برگشتی یخچال فریز را به عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند [۴]. بنبید<sup>۳</sup> و همکاران به ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های منبع تغذیه الکترونیکی با استفاده از افزونگی پرداختند. برای انجام این کار، سه روش تجزیه و تحلیل ایمنی (PSA<sup>۴</sup>) یعنی تجزیه و تحلیل درخت شکست (FTA)، بلوک قابلیت اطمینان (RBD) و شبیه‌سازی مونت کارلو (MC<sup>۵</sup>) را ارائه و توسعه دادند. روش‌های RBD و MC برای محاسبه احتمال خرابی سیستم به کار گرفته شده و با استفاده از نرم‌افزار Matlab کدگذاری شدند. روش‌های در نظر گرفته شده در سه مطالعه موردی استفاده شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که هر سه روش تقریباً نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند. علاوه بر این، قابلیت اطمینان منبع تغذیه الکترونیکی با استفاده از افزونگی افزایش یافته است [۵]. گدم<sup>۶</sup> و همکاران روشی برای شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از اکسل توسعه دادند. این روش از قابلیت‌های قدرتمند ریاضی و آماری اکسل بهره می‌برد. در این روش، نخست بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD) سیستم تحت بررسی به یک جدول در اکسل تبدیل می‌شود. هر سلول درون جدول با یک بلوک خاص در RBD مطابقت دارد. فرمول‌های زمان خرابی که وارد این سلول‌ها می‌شوند مطابق با توزیع زمان خرابی بلوک مربوطه هستند و می‌توانند توزیع‌هایی نظیر نمایی یا وایبول داشته باشند. مولد

<sup>۷</sup> Smolders

<sup>۸</sup> Relex Reliability Analysis software

<sup>۹</sup> El-Metwally

<sup>۱۰</sup> Reliability, availability and mainenability

<sup>۱۱</sup> Wind Turbine Generator

<sup>۱</sup> Woo

<sup>۲</sup> Accelerated Life Testing

<sup>۳</sup> Benbid

<sup>۴</sup> Probabilistic Safety Analysis

<sup>۵</sup> Monte Carlo Simulation

<sup>۶</sup> Gedam

اندازه‌گیری) کافی است ۲ تجهیز از ۳ تجهیز آن سالم کار کنند. همچنین، زیرسیستم چهارم شامل ۳ مجموعه موازی از پمپ تغذیه آب و تجهیزات جانبی آن (هر مجموعه شامل ۱۰ تجهیز) است. هر مجموعه توانایی پمپاژ آب به اندازه ۵۰ درصد ظرفیت نامی بویلر را دارند و به این ترتیب برای کارکرد با تمام ظرفیت، حداقل باید ۲ مجموعه سالم باشند. با این وجود چنانچه تنها یکی از مجموعه‌ها سالم باشد نیز سیستم متوقف نشده و می‌تواند به حالت نیمه بار به کار خود ادامه دهد. طبیعی است که خرابی هر ۳ مجموعه منجر به توقف سیستم می‌گردد. شکل ۱ بلوک دیاگرام‌های ترسیم شده در محیط Excel برای سیستم تغذیه آب طرح A را نشان می‌دهد.

با کلیک بر روی هر یک از بلوک‌های مربوط به سیستم تأمین آب صنعتی، صفحه دیگری در محیط Excel باز شده که نمایشگر بلوک دیاگرام تجهیزات این زیرسیستم است (شکل ۲).

با دانستن آهنگ خرابی تجهیزات این زیرسیستم، قابلیت اطمینان کل زیرسیستم اول محاسبه و عدد آن در بلوک دیاگرام اصلی قرار داده شده است. طرح B که بلوک دیاگرام آن در شکل ۳ نشان داده شده است دارای چهار پمپ تغذیه آب است که به صورت دو مجموعه بالایی و پایینی موازی ترسیم شده‌اند. هر یک از این مجموعه‌ها شامل یک پمپ تغذیه اصلی و یک پمپ افزونه و متعلقات آن‌ها است. همچنین برای هر مجموعه سه زیرسیستم کنترلی قرار داده شده است که شامل یک سیستم ذخیره تغذیه آب و تجهیزات ابزار دقیق است.

#### ۴- روش پژوهش

تکنیک RBD یک روش تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان بوده و نسبت به روش‌های شبیه‌سازی از خوانایی، دقت و سرعت مناسبی برخوردار است. این تکنیک نقاط ضعف سیستم را به خوبی مشخص نموده و نشان می‌دهد که چه نقاطی نیازمند توجه بیشتری برای بهسازی می‌باشند. لذا در مطالعه حاضر از این روش برای ارتباط با خبرگان و انجام محاسبات قابلیت اطمینان استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های به‌کارگیری این روش، نقش‌های متفاوتی است که هر یک از اجزاء در خرابی کل سیستم دارند. در سیستم تغذیه آب نقش‌های تجهیزات در خرابی سیستم به صورت زیر دسته‌بندی شدند:

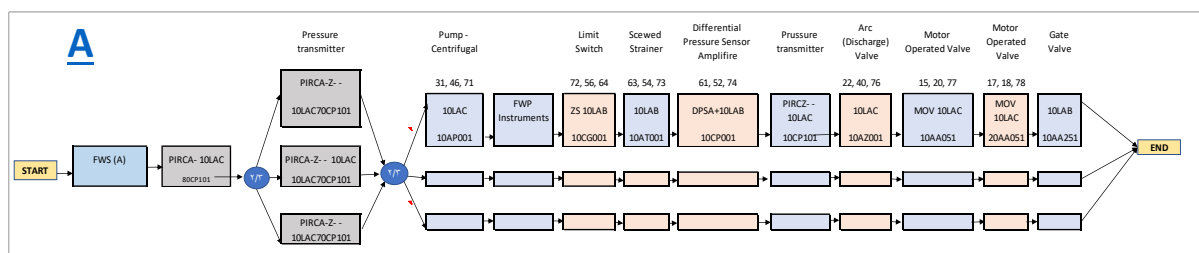
جهانی به دست آوردند. در آخر نیز دو نوع مولد القایی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مولد القایی نوع اول دارای قابلیت اطمینان بالا، سطح نگهداری و تعمیرات پایین و دسترسی‌پذیری متوسط است و مولد القایی نوع دوم دارای قابلیت اطمینان پایین، سطح نگهداری و تعمیرات متوسط و دسترسی‌پذیری پایین است [۸].

#### ۳- بیان مساله

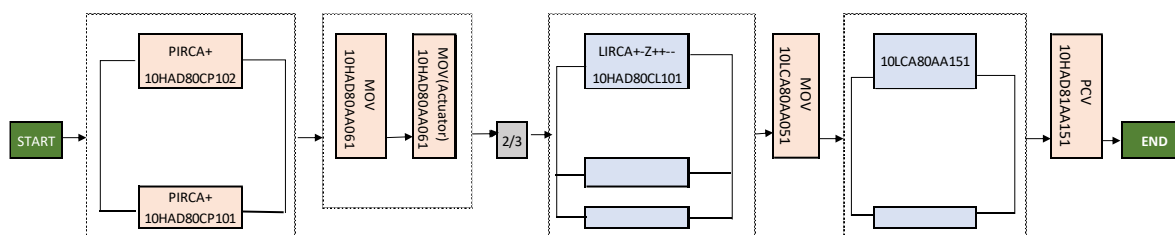
در راستای انجام مطالعات و فعالیت‌های مربوط به پروژه مهندسی ارزش در شرکت مهندسی ساخت و تجهیزات مینا، پروژه مطالعاتی بررسی و مقایسه دو سیستم تغذیه آب با پیکربندی متفاوت تعریف گردید. برای این منظور، از آنجا که تنها تعداد معدودی از تجهیزات سیستم نقش اساسی در عملکرد آن دارند، به نحوی که خرابی آن‌ها منجر به توقف بویلر می‌شود، این اجزاء شناسایی شده و با به‌کارگیری دانش کارشناسان و متخصصان طراحی و مطالعه نقشه‌های فرآیند و ابزار دقیق<sup>۱</sup> (P&ID)، نمودار بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم تغذیه آب ترسیم گردید (شکل‌های ۱ و ۳). برای ایجاد درک کامل‌تر از تجهیزات ترسیم شده در RBD برای کارشناسان فنی، علاوه بر کد فنی تجهیزات، علائم مربوط به هر یک از آن‌ها در نقشه‌های P&ID در بلوک دیاگرام نیز ترسیم شد. آنگاه با مقایسه میانگین زمان بین دو خرابی متوالی سیستم تغذیه آب بویلر بازیاب برتر از بین دو طرح پیشنهادی A و B برگزیده شد. در این قسمت توضیحاتی در مورد این دو پیکربندی ارائه می‌شود. شکل ۱ سیستم تغذیه آب طرح A را نشان می‌دهد. این طرح دارای ۴ زیرسیستم اصلی است که با یکدیگر به صورت سری قرار گرفته‌اند.

همانطور که گفته شد سیستم تغذیه آب طرح A دارای ۴ زیرسیستم اصلی است. در طرح A، زیرسیستم اول یک سیستم تأمین آب صنعتی، زیرسیستم دوم یک تجهیز ابزار دقیق کنترل فشار، زیرسیستم سوم سه تجهیز ابزار دقیق اندازه‌گیری و زیرسیستم چهارم شامل ۳ مجموعه موازی از پمپ تغذیه آب است. این زیرسیستم‌ها به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند. برای کارکرد صحیح زیرسیستم سوم (زیرسیستم ابزار دقیق

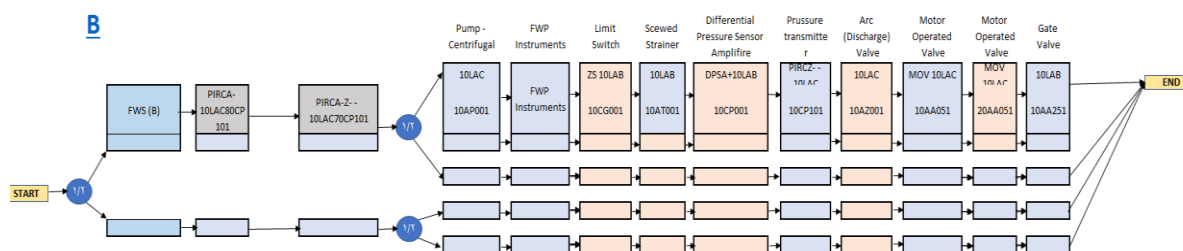
<sup>1</sup> Piping & Instrumentation Diagram



شکل ۱- پیکربندی سیستم تغذیه آب طرح A



شکل ۲- پیکربندی زیرسیستم تأمین آب صنعتی



شکل ۳- پیکربندی سیستم تغذیه آب طرح B

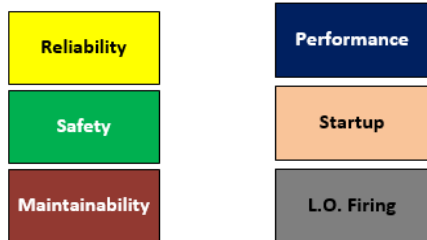
• ایمنی

تجهیزاتی هستند که انحصاراً برای افزایش ایمنی به کار گرفته شده‌اند و بدون آن‌ها هم سیستم به طور کامل عمل می‌کند. خرابی این‌گونه تجهیزات هیچ‌گونه اثری در عملکرد بویلر ندارد. این تجهیزات یا ریسک وقوع حوادث را کاهش داده و یا تنها در هنگام بروز خطر یا حادثه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بلوک دیاگرام با رنگ سبز مشخص شده است. نمونه‌هایی از تجهیزات این سیستم‌ها شیرهای قطع و شیرهای ایمنی فشار هستند.

• کارایی

در کنار تجهیزات فوق تجهیزات دیگری هستند که خرابی آن‌ها موجب توقف و یا خرابی بویلر نمی‌شود ولی راندمان و کارایی آن را به عنوان یک مبدل حرارتی کاهش می‌دهد. خرابی برخی دیگر از این تجهیزات موجب فرسایش و یا خوردگی در دراز مدت شده و با ایجاد خستگی و تنش‌های حرارتی-مکانیکی مکرر باعث خرابی بویلر می‌شوند و در بلوک دیاگرام با رنگ بنفش مشخص شده است. برخی از سیستم‌های کنترل دما و فشار در این دسته قرار می‌گیرند.

استفاده از رنگ‌های مختلف نقش قابلیت اطمینانی هر قطعه بر طبق راهنمای شکل ۴ انجام شد.

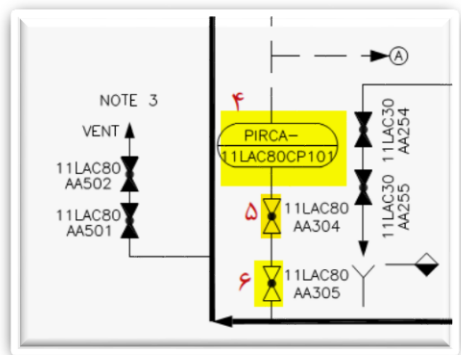


شکل ۴- راهنمای رنگ‌های به کار رفته برای نمایش انواع نقش‌های قابلیت اطمینانی تجهیزات در BRD

با توجه به توضیحات فوق، در ادامه گام‌های انجام مطالعه برای بهینه‌سازی قابلیت اطمینان عملکردی سیستم تغذیه آب بویلر HRSG به شرح زیر توضیح داده می‌شوند:

**گام ۱. شناسایی تجهیزات مورد استفاده در FWS**

نخست تمام اطلاعات مربوط به بویلر که برای ارزیابی قابلیت اطمینان موردنیاز است گردآوری گردید. این اطلاعات به طور کلی شامل نقشه‌های P&ID و اسناد فنی و دستورالعمل‌های سرویس و نگهداری می‌باشد. سپس زیرسیستم‌های اصلی مورد شناسایی قرار گرفت و وظیفه مربوط به هر یک تعیین گردید. شکل ۵ بخشی از نقشه‌های فرآیند و ابزار دقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نقشه‌های فرآیند و ابزار دقیق (P&ID)

**گام ۲. تعیین عناصر بحرانی سیستم**

در این مرحله در جلسات کارشناسان فنی مکانیک، کنترل و ابزار دقیق و شیمی، بحرانی‌ترین تجهیزات سیستم تغذیه آب بویلر که نقص آن‌ها منجر به توقف بویلر می‌شوند، شناسایی شدند.

**• راه‌اندازی**

شامل تجهیزاتی است که تنها در زمان راه‌اندازی کاربرد دارند؛ بنابراین خرابی آن‌ها در حین عملکرد بویلر موجب توقف آن نمی‌شود و در بلوک دیاگرام با رنگ صورتی مشخص شده است.

**• تعمیرپذیری**

این تجهیزات عموماً برای سهولت جداسازی بخش‌هایی از بویلر در هنگام تعمیرات آن به کار گرفته شده و در سایر مواقع کاربردی ندارند و در بلوک دیاگرام با رنگ قهوه‌ای مشخص شده‌اند. نمونه‌هایی از این تجهیزات دمپرهای<sup>۱</sup> و شیرهای ایزوله‌کننده<sup>۲</sup> هستند.

**• تغییر سوخت**

تجهیزاتی هستند که برای تغییر سوخت مصرفی از گاز به مازوت و برعکس استفاده می‌شوند و در بلوک دیاگرام با رنگ خاکستری مشخص شده است. نمونه‌هایی از این تجهیزات شیرآلات، فیلترهای تصفیه و سیستم‌های کنترل دما و فشار سوخت مورد استفاده هستند.

بر این اساس ناگزیر، بر اساس نقش‌های متفاوت تجهیزات، چندین نوع قابلیت اطمینان برای مدت یک سال کاری (365\*24=8760 ساعت) به شرح زیر تعریف گردید:

۱. قابلیت اطمینان کارکردی<sup>۳</sup> (OR)
۲. قابلیت اطمینان کارایی<sup>۴</sup> (PR)
۳. قابلیت اطمینان ایمنی<sup>۵</sup> (SR)
۴. قابلیت اطمینان راه‌اندازی<sup>۶</sup> (SUR): این نوع قابلیت اطمینان بر اساس میانگین نسبت دفعات راه‌اندازی بی‌نقص به میانگین کل دفعات اقدام برای راه‌اندازی در طول سال محاسبه می‌شود و یکی از انواع قابلیت اطمینان بر اساس نیاز<sup>۷</sup> است.
۵. قابلیت اطمینان تعمیرپذیری<sup>۸</sup> (MR)
۶. قابلیت اطمینان تغییر سوخت<sup>۹</sup> (FR)

1 Damper  
 2 Isolation Valves  
 3 Operation Reliability  
 4 Performance Reliability  
 5 Safety Systems Reliability  
 6 Start-Up Reliability  
 7 On Demand  
 8 Maintainability Reliability

<sup>9</sup> Fuel change Reliability

### گام ۳. تعیین آهنگ خرابی هر تجهیز

از آنجا که اطلاعاتی در مورد پیشینه خرابی تجهیزات در دسترس نبود برای دستیابی به آهنگ خرابی تجهیزات با شرکت خارجی تهیه‌کننده آن‌ها مکاتبه شد که آن‌ها توصیه به استفاده از کتابچه‌های استاندارد نمودند. به این ترتیب از آهنگ خرابی تجهیزات مستخرج از این کتابچه‌ها با تأیید کارشناسان طراحی مکانیک، مهندسی شیمی و کنترل و ابزار دقیق استفاده شد. شکل ۶ صفحه مربوط به پایگاه داده آهنگ خرابی تجهیزات در محیط Excel را نشان می‌دهد. در جدول نشان داده شده در این شکل، هر سطر مربوط به یک تجهیز می‌باشد.

ستون‌های زرد رنگ مرجع اطلاعات را به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین آهنگ خرابی آن‌ها را بر طبق استانداردهای در دسترس نشان می‌دهد. در اولین ستون زرد رنگ برای تجهیزاتی که آهنگ خرابی آن‌ها در مرجع OREDA وجود داشت، حرف O، تجهیزاتی که آهنگ خرابی آن‌ها با استفاده از آمار خرابی سازمان انرژی اتمی محاسبه شده است حرف R و تجهیزاتی که آهنگ خرابی آن‌ها از مرجع IEEE 500 استخراج شده است حرف I قرار داده شد. همچنین اعداد ذکر شده در کنار این حروف نشان‌دهنده صفحه‌ای از مرجع مورد نظر است که اطلاعات از آنجا استخراج شده است. چنانچه اطلاعات یک تجهیز در دو استاندارد متفاوت موجود بود، این اطلاعات در ستون‌های زرد رنگ و سبز رنگ درج شده‌اند.

در این پژوهش از میانگین ارائه شده توسط استاندارد OREDA به عنوان بهترین برآوردگر نقطه‌ای آهنگ خرابی استفاده شده است. آهنگ خرابی در مستندات علمی من جمله استاندارد OREDA دارای توزیع مربع کای دانسته شده است. لازم به ذکر است که مقدار میانگین ارائه شده در استاندارد با توجه به چولگی تابع مربع کای محاسبه شده و در وسط حدود بالا و پایین قرار

ندارد. بنابراین در نبود اطلاعات سابقه خرابی، میانگین نمونه همواره یک برآوردگر نارایب از میانگین جامعه است و این امر مستقل از تابع توزیع متغیر تصادفی است. همچنین کارشناسان شرکت مپنا بویلر بر استفاده از میانگین ارائه شده توسط استاندارد OREDA به عنوان برآورد پایه قابلیت اطمینان سیستم تأکید داشته‌اند. همچنین در این پژوهش کاربر می‌تواند مقدار انتخابی خود را برای آهنگ خرابی هر قطعه جایگزین مقدار پیشنهادی در استاندارد OREDA نموده و برنامه اکسل بر اساس فرمول‌های قرار داده شده در آن، همه نتایج محاسبات را به‌هنگام می‌کند.

### گام ۴. ترسیم بلوک دیاگرام

با در نظر گرفتن تجهیزات در قالب بلوک‌های موازی، سری و سوئیچ‌ها، بلوک دیاگرام سیستم تغذیه آب ترسیم شدند. لازم به ذکر است که مدل‌سازی سیستم غالباً متناظر با شبکه فیزیکی نبوده بلکه سیستم فیزیکی بر اساس منطق عملیاتی و درک عمیق از الزامات عملکرد آن به دیاگرام قابلیت اطمینان تبدیل شده است. قوانین کلی زیر برای ترسیم RBD رعایت شده است:

- احتمال خرابی هر بلوک مستقل از خرابی سایر بلوک‌ها در نظر گرفته شده است. در صورتیکه مشخص شود دلایل مشترکی برای خرابی تجهیزات وجود دارد و یا خرابی تجهیزات به یکدیگر وابسته باشد باید این وابستگی‌ها با احتمال شرطی لحاظ شود. این امر در کلیت پژوهش تأثیر نداشته ولی نیازمند بازنگری محاسبات قابلیت اطمینان در بلوک دیاگرام خواهد بود.
- عملکرد هر بلوک به صورت جداگانه قابل شناسایی باشد.

Equipment	I=IEEE 500				2				Reliability (1 year)	
	Reference	Lower	Mean	Upper	Reference	Lower	Mean	Upper		
<b>Compressor</b>										
Compressor	O58	0.08	268.58	1176					268.58	0.0951
Compressor - Centrifugal	R252	0.51	0.54	0.57					0.54	0.9953
Compressor - Centrifugal - Electric Driven	O76	0.92	113.56	382.31					113.56	0.3698
Compressor - Centrifugal - Electric Driven (100-1000 KW)	O79	10.11	256.43	772.46					256.43	0.1058
Compressor - Centrifugal - Electric Driven (1000-3000 KW)	I141		0.14		R56	1.45	15	200	0.14	0.9988
Compressor - Centrifugal - Electric Driven (3000-10000 KW)	O83	0.43	63.81	220.36					63.81	0.5718
Compressor - Centrifugal - Turbine Driven	R263	0.2	10	50					10	0.9161
Compressor - Centrifugal - Turbine Driven (3000-10000 KW)	O89	8.93	88.85	239.78					88.85	0.4592

شکل ۶- پایگاه داده آهنگ خرابی تجهیزات

t: زمان مورد مطالعه (برای ۱ سال)

λ: آهنگ خرابی تجهیز برحسب بار در یک میلیون ساعت

بنابراین قابلیت اطمینان هر یک از تجهیزات، برای ۱ سال، با استفاده از فرمول ذیل محاسبه گردید:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{8760\lambda}{10^6}\right)t} \quad (2)$$

مفروض اصلی استاندارد OREDA ثابت بودن نرخ خرابی است و این مفروض با در نظر گرفتن دوران بلوغ (عمر مفید) تجهیزات است که در آن آهنگ خرابی تقریباً ثابت است.

**محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم تغذیه آب**

در این مرحله، با استفاده از قابلیت اطمینان هر یک از تجهیزات و ارتباط کارکردی بین آنها که در دیاگرام بلوکی رسم شده است فرمول‌های (۳) و (۴) برای محاسبه، قابلیت اطمینان کل سیستم تغذیه آب بویلر به کار گرفته شدند:

برای تجهیزات سری:

$$\prod_{i=1}^n (R_i) = R_{sys} \quad (3)$$

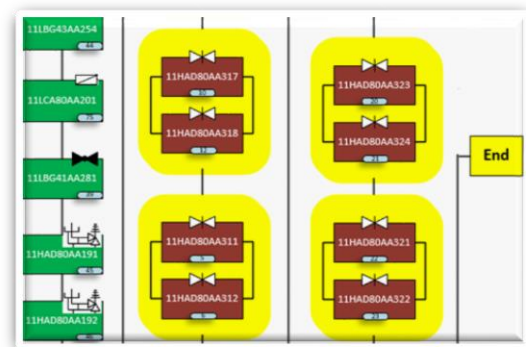
برای تجهیزات موازی:

$$R_{sys} = 1 - \left( \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \right) \quad (4)$$

شکل ۹ مقادیر قابلیت اطمینان هر تجهیز و سیستم کلی تغذیه آب بویلر حرارتی طرح A را نشان می‌دهد.

به همین ترتیب مقادیر قابلیت اطمینان برای هر تجهیز و سیستم کلی تغذیه آب بویلر حرارتی طرح B نیز محاسبه و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

بخشی از نمودار RBD تجهیزات سیستم تغذیه آب در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۸- بلوک دیاگرام تجهیزات

**گام ۵. محاسبه قابلیت اطمینان هر تجهیز**

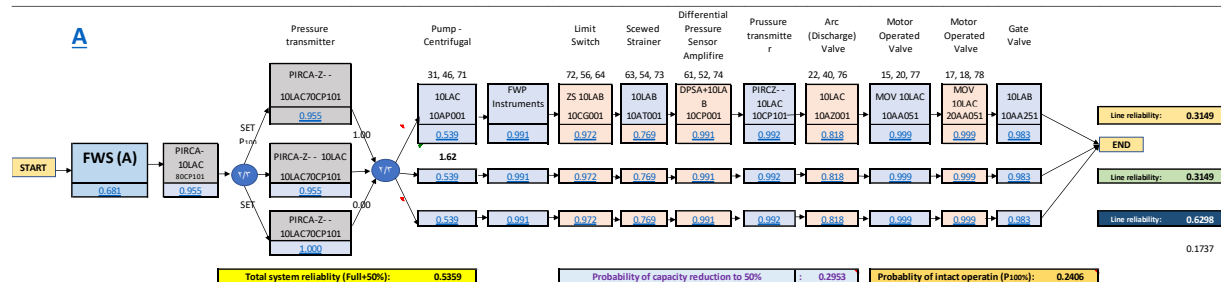
در این مرحله با فرض قرار داشتن سیستم تغذیه آب و زیرسیستم‌های آن در بازه دوران بلوغ و در نتیجه پذیرش تابع احتمال خرابی آنها به صورت توزیع نمائی، قابلیت اطمینان تجهیز را برای آهنگ خرابی مشخص شده و در آخرین ستون سمت راست (سلول سفید رنگ) درج می‌شود. لازم به ذکر است که آهنگ خرابی تجهیزات در دستورالعمل‌های استاندارد، برای یک میلیون ساعت کار نشان داده شده است و از آنجا که قابلیت اطمینان در این پژوهش برای مدت یک سال مدنظر قرار گرفته است؛ قابلیت اطمینان سالانه آنها از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{8760\lambda t}{10^6}\right)} \quad (1)$$

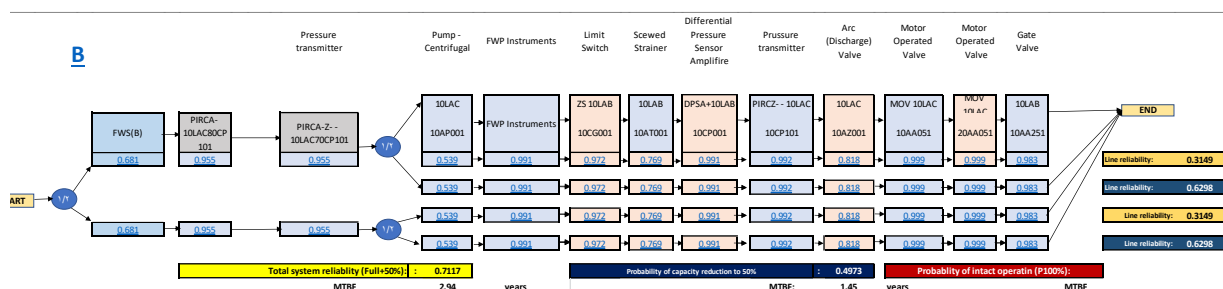
که در آن:

R: قابلیت اطمینان تجهیز (احتمال عدم خرابی در مدت یک سال، برابر ۸۷۶۰ ساعت)





شکل ۹- محاسبه قابلیت اطمینان سیستم تغذیه آب طرح A



شکل ۱۰- محاسبه قابلیت اطمینان سیستم تغذیه آب طرح B

### ۶- بحث

به دلیل عدم قطعیت اطلاعات نرخ خرابی قطعات، در مقاله اثر تغییر قابلیت اطمینان این قطعات در بازه گسترده‌ای بررسی شده است تا حساسیت تصمیم بهینه در انتخاب پیکربندی نسبت به تغییر این پارامتر نشان داده شود و تحلیل شود. در ادامه، با تغییر مقادیر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها بر پایه نظر کارشناسان، زمان بین خرابی برای دو طرح A و B باز محاسبه شده و نتایج تحلیل می‌شوند. برای این منظور  $R_{123}^A$  به‌عنوان قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اول، دوم و سوم طرح A و  $R_{123}^B$  به‌عنوان قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اول، دوم و سوم طرح B در نظر گرفته می‌شوند.

پس از محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از پیکربندی‌های پیشنهادی می‌توان میانگین فاصله بین دو خرابی متوالی آن‌ها بر حسب سال را نیز از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$MTBF = (-\ln(R_{sys}))^{-1} \quad (4)$$

### ۵- یافته‌ها

پس از حل مسئله مقادیر بهینه متغیرها محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نتایج مطالعه موردی

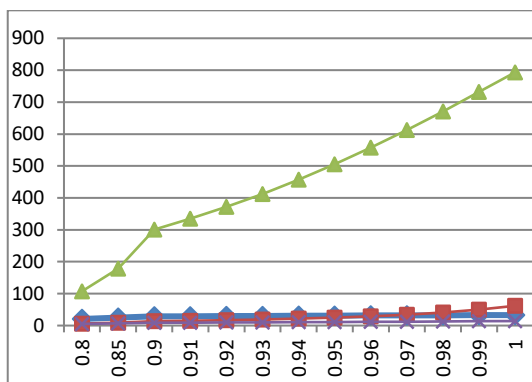
	A	B		
	توقف	نیمه بار	توقف	نیمه بار
	احتمال خرابی	۰/۱۵۵۹۱	۰/۴۴۶۷	۰/۴۴۳۳
	قابلیت اطمینان	۰/۴۴۰۹	۰/۷۱۳۳	۰/۵۵۶۷
	میانگین زمان بین دو خرابی	۱/۲۲	۲/۹۶	۱/۷۱

پس از تبدیل این زمان‌ها به روز مشخص می‌شود که به طور میانگین، طرح A با ۳ پمپ تغذیه آب هر ۴۴۵ روز یک‌بار متوقف شده و هر ۱۰۸۰ روز یک‌بار نیز در حالت نیمه بار قرار می‌گیرد؛ اما طرح B با ۴ پمپ تغذیه آب هر ۶۱۷ روز یک‌بار متوقف شده و هر ۶۲۴ روز یک‌بار نیز در حالت نیمه بار قرار می‌گیرد.

جدول ۳: زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = 0.10, R_B = 0.99$

$R_{FWP}$	MTBF (years)			
	۲ of ۳		۲(1 of ۲)	
	٪	٪۵۰	٪	٪۵۰
۰/۸	۲۰/۷	۶/۳	۱۰۷/۵	۵/۲
۰/۸۵	۲۴/۹	۸/۹	۱۷۸/۱	۶/۷
۰/۹	۲۸/۵	۱۳/۹	۳۰۱/۰	۸/۷
۰/۹۱	۲۹/۲	۱۵/۴	۳۳۴/۵	۹/۲
۰/۹۲	۲۹/۸	۱۷/۲	۳۷۱/۵	۹/۷
۰/۹۳	۳۰/۳	۱۹/۴	۴۱۲/۵	۱۰/۲
۰/۹۴	۳۰/۸	۲۲/۰	۴۵۶/۷	۱۰/۷
۰/۹۵	۳۱/۲	۲۵/۲	۵۰۵/۱	۱۱/۳
۰/۹۶	۳۱/۶	۲۹/۳	۵۵۷/۱	۱۱/۸
۰/۹۷	۳۱/۹	۳۴/۴	۶۱۲/۶	۱۲/۴
۰/۹۸	۳۲/۲	۴۱/۰	۶۷۱/۰	۱۳/۰
۰/۹۹	۳۲/۵	۴۹/۸	۷۳۱/۶	۱۳/۵
۱	۳۲/۷	۶۱/۹	۷۹۳/۴	۱۴/۱

اگر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اول، دوم و سوم ۹۹ درصد فرض شود، حالت چهار پمپه از نظر عدم وقوع توقف کامل ۵ تا ۲۰ برابر بهتر و از نظر قابلیت اطمینان نیمه بار کمی بدتر از حالت ۳ پمپه عمل می‌کند.



شکل ۱۲- زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = 0.10, R_B = 0.99$

میانگین زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = 0.99$  و  $R_B = 0.95$  در جدول ۴ و شکل ۱۲ نشان داده است.

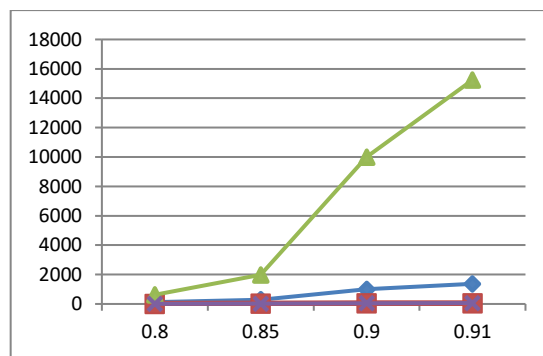
همچنین قابلیت اطمینان زیرسیستم چهارم (پمپ تغذیه آب) را نشان می‌دهد. میانگین زمان بین دو خرابی و کار نیمه بار در سیستم تغذیه آب با فرض  $R_{123}^A = R_{123}^B = 1$  در جدول ۲ نشان داده است.

جدول ۲: زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_{123}^B = 1 \text{ و } R_{123}^A = 1$$

$R_{FWP}$	MTBF (years)			
	سه پمپه		چهار پمپه	
	توقف	نیمه بار	توقف	نیمه بار
۰/۸	۱۲۴/۵	۹/۹	۶۲۴/۵	۱۲/۵
۰/۸۵	۲۹۵/۸	۱۶/۹	۱۹۷۴/۸	۲۲/۲
۰/۹	۹۹۹/۵	۳۶/۵	۹۹۹۹/۵	۵۰/۰
۰/۹۱	۱۳۷۱/۲	۴۴/۷	۱۵۲۴۱/۰	۶۱/۷

اگر قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اول، دوم و سوم ۱ فرض شود همواره حالت چهار پمپه با داشتن زمان‌های بین توقف بیشتر، بر حالت ۳ پمپه ارجحیت خواهد داشت. البته در هر دو پیکربندی، توقف هر چند صدسال یک‌بار رخ می‌دهد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- میانگین فاصله زمانی بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = R_B = 1$

به همین ترتیب، میانگین زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب با فرض  $R_A = R_B = 0.99$  در جدول ۳ و شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۴: زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.10, R_B = 0.9995$$

$R_{FWP}$	MTBF (years)			
	۲ of ۳		۲(1 of ۲)	
	۰٪	٪۵۰	٪۰	٪۵۰
۰/۸	۵/۸	۷/۲	۲۴/۲	۲/۶
۰/۸۵	۶/۱	۱۰/۲	۲۹/۵	۲/۸
۰/۹	۶/۳	۱۵/۸	۳۵/۲	۳/۱
۰/۹۱	۶/۳	۱۷/۵	۳۶/۴	۳/۱
۰/۹۲	۶/۴	۱۹/۶	۳۷/۵	۳/۲
۰/۹۳	۶/۴	۲۲/۰	۳۸/۶	۳/۲
۰/۹۴	۶/۴	۲۵/۰	۳۹/۷	۳/۲
۰/۹۵	۶/۴	۲۸/۶	۴۰/۸	۳/۳
۰/۹۶	۶/۴	۳۳/۲	۴۱/۸	۳/۳
۰/۹۷	۶/۵	۳۸/۹	۴۲/۷	۳/۴
۰/۹۸	۶/۵	۴۶/۴	۴۳/۷	۳/۴
۰/۹۹	۶/۵	۵۶/۴	۴۴/۵	۳/۴
۱	۶/۵	۷۰/۱	۴۵/۳	۳/۵

جدول ۵: زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.10, R_B = 0.95$$

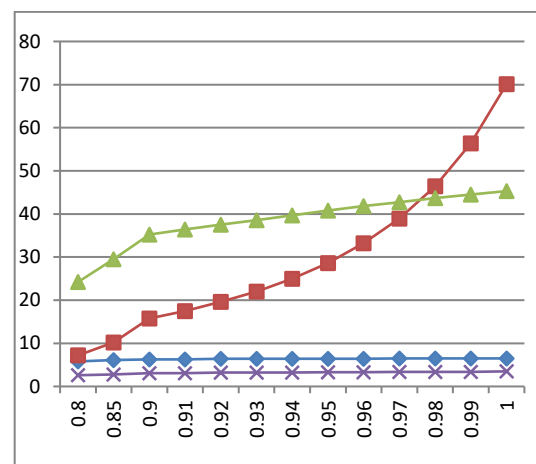
$R_{FWP}$	MTBF (years)			
	۲ of ۳		۲(1 of ۲)	
	۰٪	٪۵۰	٪۰	٪۵۰
۰/۸	۳/۸	۲/۸	۸/۶	۱/۷
۰/۸۵	۴/۲	۳/۱	۱۰/۲	۱/۸
۰/۹	۴/۵	۳/۵	۱۲/۱	۱/۹
۰/۹۱	۴/۶	۳/۶	۱۲/۵	۲/۰
۰/۹۲	۴/۷	۳/۷	۱۲/۹	۲/۰
۰/۹۳	۴/۷	۳/۸	۱۳/۴	۲/۰
۰/۹۴	۴/۸	۳/۹	۱۳/۸	۲/۰
۰/۹۵	۴/۹	۴/۰	۱۴/۳	۲/۱
۰/۹۶	۴/۹	۴/۱	۱۴/۸	۲/۱
۰/۹۷	۵/۰	۴/۲	۱۵/۳	۲/۱
۰/۹۸	۵/۱	۴/۴	۱۵/۸	۲/۲
۰/۹۹	۵/۱	۴/۵	۱۶/۳	۲/۲
۱	۵/۲	۴/۷	۱۶/۹	۲/۲

میانگین زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = 0.9$  و  $R_B = 0.9$  در جدول ۶ و شکل ۱۴ نشان داده است.

جدول ۶: زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.10, R_B = 0.9$$

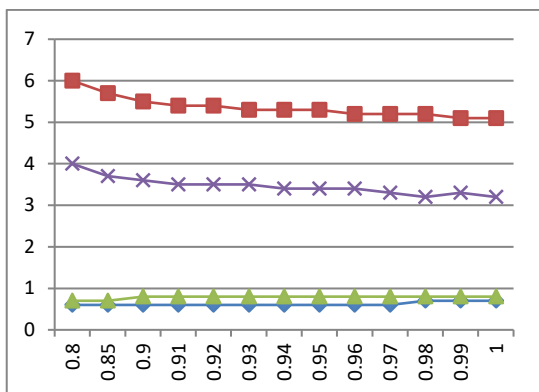
$R_{FWP}$	MTBF (years)			
	۲ of ۳		۲(1 of ۲)	
	۰٪	٪۵۰	٪۰	٪۵۰
۰/۸	۱/۶	۲/۶	۲/۴	۱/۵
۰/۸۵	۱/۶	۲/۶	۲/۶	۱/۵
۰/۹	۱/۷	۲/۶	۲/۸	۱/۵
۰/۹۱	۱/۸	۲/۶	۲/۹	۱/۵
۰/۹۲	۱/۸	۲/۶	۲/۹	۱/۵
۰/۹۳	۱/۸	۲/۶	۳/۰	۱/۵
۰/۹۴	۱/۸	۲/۷	۳/۰	۱/۵
۰/۹۵	۱/۸	۲/۷	۳/۱	۱/۵
۰/۹۶	۱/۹	۲/۷	۳/۱	۱/۵
۰/۹۷	۱/۹	۲/۷	۳/۲	۱/۵
۰/۹۸	۱/۹	۲/۷	۳/۳	۱/۴
۰/۹۹	۱/۹	۲/۷	۳/۳	۱/۴
۱	۱/۹	۲/۷	۳/۴	۱/۴



شکل ۱۳- زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.10, R_B = 0.95$$

حالت چهار پمپه از نظر توقف کامل ۵ تا ۹ برابر بهتر و از نظر قابلیت اطمینان ۵۰ درصد، ۳ تا ۲۰ برابر بدتر از حالت ۳ پمپه عمل می‌کند. میانگین زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = 0.95$  و  $R_B = 0.95$  در جدول ۵ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. حالت چهار پمپه از نظر توقف کامل ۲/۵ تا ۳ برابر بهتر و از نظر قابلیت اطمینان ۵۰ درصد، ۱/۵ تا ۲ برابر بدتر از حالت ۳ پمپه است.



شکل ۱۵- زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.1, R_B = 0.8$$

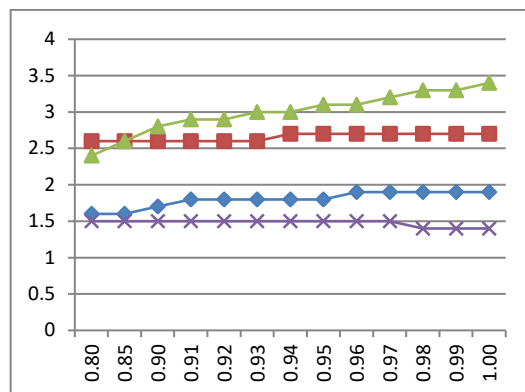
حالت چهار پمپه از نظر توقف کامل ۱/۱ برابر بهتر و از نظر قابلیت اطمینان نیمه بار ۱/۵ برابر بدتر از حالت ۳ پمپه است.

بدیهی است که نتایج به دست آمده فقط در صورت درستی مفروضات اصلی به واقعیت نزدیک خواهند بود و در غیر اینصورت ممکن است با واقعیت فاصله زیادی پیدا کنند.

#### ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش دو پیکربندی متفاوت برای بویلر بازیاب که در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی استفاده می‌شوند، از نظر میانگین‌های فاصله زمانی بین دو توقف کامل و دو حالت نیمه بار مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید که علیرغم انتظار، حالت ۴ پمپه با وجود هزینه بیشتر در همه موارد برتری ندارد و برتری آن تا حد زیادی وابسته به قابلیت اطمینان تجهیزات دیگری به جز پمپ تغذیه آب است. همچنین نقش طراحی بخش ابزار دقیق که به نحو چشمگیری در حالت ۳ پمپه بهبود یافته است، تأثیر بسزایی در افزایش قابلیت اطمینان سیستم تغذیه آب بازی می‌کند. با این تفاسیر پیشنهادات زیر ارائه شدند:

۱- افزایش قابلیت اطمینان پیکربندی ۴ پمپه، با در نظر گرفتن آهنگ خرابی استاندارد برای تجهیزات، هزینه بیشتر آن را توجیه می‌کند.



شکل ۱۴- زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.1, R_B = 0.9$$

حالت ۴ پمپه از نظر توقف کامل ۱/۵ تا ۱/۸ برابر بهتر و از نظر قابلیت اطمینان نیمه بار ۱/۷ تا ۱/۹ برابر بدتر از حالت ۳ پمپه است. میانگین زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس  $R_A = 0.8$  و  $R_B = 0.8$  در جدول ۷ و شکل ۱۵ نشان داده است.

جدول ۷: زمان بین دو خرابی در سیستم تغذیه آب بر اساس

$$R_A = 0.1, R_B = 0.8$$

$R_{FWP}$	MTBF (years)			
	۲ of ۳		۲ (1 of ۲)	
	۰٪	۵۰٪	۰٪	۵۰٪
۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۷	۴/۰
۰/۸۵	۰/۶	۵/۷	۰/۷	۳/۷
۰/۹	۰/۶	۵/۵	۰/۸	۳/۶
۰/۹۱	۰/۶	۵/۴	۰/۸	۳/۵
۰/۹۲	۰/۶	۵/۴	۰/۸	۱/۵۳
۰/۹۳	۰/۶	۵/۳	۰/۸	۳/۴
۰/۹۴	۰/۶	۵/۳	۰/۸	۳/۴
۰/۹۵	۰/۶	۵/۳	۰/۸	۳/۴
۰/۹۶	۰/۶	۵/۲	۰/۸	۳/۴
۰/۹۷	۰/۶	۵/۲	۰/۸	۳/۳
۰/۹۸	۰/۷	۵/۲	۰/۸	۳/۲
۰/۹۹	۰/۷	۵/۱	۰/۸	۳/۳
۱	۰/۷	۵/۱	۰/۸	۳/۲

[4] Woo, S. W., Pecht, M., & O'Neal, D. L. (2020). Reliability design and case study of the domestic compressor subjected to repetitive internal stresses. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106604.

[5] Benabid, R., Merrouche, D., Bourenane, A., & Alzbutas, R. (2018, October). Reliability Assessment of Redundant Electrical Power Supply Systems using Fault Tree Analysis, Reliability Block Diagram, and Monte Carlo Simulation Methods. In *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)* (pp. 1-7). IEEE.

[6] Gedam, S. G., & Beaudet, S. T. (2000, January). Monte Carlo simulation using Excel (R) spreadsheet for predicting reliability of a complex system. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No. 00CH37055)* (pp. 188-193). IEEE.

[7] Smolders, K., Long, H., Feng, Y., & Tavner, P. (2010). Reliability analysis and prediction of wind turbine gearboxes. In *European Wind Energy Conference and Exhibition 2010, EWEC 2010* (Vol. 4, pp. 2660-2682). Sheffield.

[8] El-Metwally, M., El-Shimy, M., Mohamed, A., Elshahed, M., & Sayed, A. (2017, December). Reliability assessment of wind turbine operating concepts using reliability block diagrams (RBDs). In *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)* (pp. 430-436). IEEE.

۲- برتری پیکربندی ۴ پمپ می‌تواند تحت تأثیر تفاوت قابلیت اطمینان تجهیزات با مقادیر استاندارد قرار گیرد؛ بنابراین کسب اطلاعات دقیق از آهنگ خرابی تجهیزات بسیار مهم است.

۳- بهبود در طراحی سایر تجهیزات ارزان‌تر، بخصوص تجهیزات ابزار دقیق و یا تأمین این تجهیزات از تأمین‌کنندگان معتبر نقش بیشتری از افزودن پمپ تغذیه آب به صورت افزونه دارد.

## مراجع

[1] Lisnianski, A. (2007). Extended block diagram method for a multi-state system reliability assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(12), 1601-1607.

[2] Jakkula, B., Mandela, G. R., & SN, M. C. (2020). Reliability block diagram (RBD) and fault tree analysis (FTA) approaches for estimation of system reliability and availability—a case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*.

[3] Sujatha, M., & Parvathy, A. K. (2020). Investigation of Reliability of DC–DC Converters Using Reliability Block Diagram and Markov Chain Analysis. In *Reliability, Safety and Hazard Assessment for Risk-Based Technologies* (pp. 851-863). Springer, Singapore.

