



## Optimization of Design of HRSG Boilers at Cyclic Power Plants

**Mahmoud Shahrokhi** \*

Mahmoud Shahrokhi, Associate Professor,  
Department of Industrial Engineering,  
Faculty of Engineering, University of  
Kurdistan, Sanandaj, Iran

**Mohammad Farhadi** 

Master of Industrial Engineering, Faculty of  
Engineering, University of Kurdistan,  
Sanandaj, Iran

### Abstract

In combined cycle power plants, instead of releasing gases produced from burning fossil fuels, after turning the gas turbines, they enter into heat recovery steam generator (HRSG) boilers to produce steam. The produced steam by these boilers is used to generate electricity in steam turbines and thus, electricity generation efficiency is dramatically increased. In this way, the efficiency of electricity production increases significantly. These boilers are made at a great cost and also, any failures of them cause a power plant to stop and create enormous costs, so optimizing their reliability is very important. This paper deals with the modeling of the HRSG feed water system by using a block diagram for two states (i.e., half-time and full load), to evaluate the difference between the proposed alternative designs, by considering their reliability. The method used in this paper can be applied to evaluate and optimize the reliability of many other industrial systems.

### 1. Introduction

In power generation, the reliability of industrial control systems is crucial, as failures can disrupt services, leading to accidents and damages. This study focuses on the reliability of Heat Recovery Steam Generator (HRSG) boilers in combined cycle power plants.

\* Corresponding Author: [Shahrokhi292@yahoo.com](mailto:Shahrokhi292@yahoo.com)

**How to Cite:** Shahrokhi, M., Farhadi, M. (2024). Optimization of Design of HRSG Boilers at Cyclic Power Plants, *Industrial Management Studies*, 22(72), 1-35.

These plants optimize electricity generation by redirecting gases from burning fossil fuels into heat recovery steam generators. HRSG boiler reliability is pivotal due to high construction costs and the potential for extensive downtime and expenses in case of malfunctions. Addressing this challenge, the research employs the underutilized Reliability Block Diagram (RBD) model, providing a graphical representation of system components and interactions. Specifically tailored to the needs of the Mapna Boiler Company, the study aims to assess and optimize the reliability of the steam production unit, i.e., the boiler, within combined cycle power plants.

## **2. Research Background**

Reliability, in conjunction with factors such as availability and safety, stands as a cornerstone in ensuring the practical quality of any system. The application of Reliability Block Diagrams (RBD) is a well-established method for modeling and calculating the reliability of industrial systems. Numerous studies have applied RBDs across diverse domains, ranging from power substation automation and wind turbine reliability to error calculations in intelligent submarine power systems. However, despite the versatility of RBDs, a noticeable gap exists in the literature regarding their use for modeling boiler reliability, especially as a multi-state system.

## **3. Research Methodology**

To undertake a comprehensive reliability analysis of HRSG boilers, the study focuses on distinct subsystems, including:

- 1) Feed-Water Storage System
- 2) Feed-Water System (FWS)
- 3) High-Pressure (HP) Section
- 4) Low-Pressure (LP) Section
- 5) Condensate System
- 6) Chemical Dosing System.

The Feed-Water System (FWS) is crucial for immediate boiler operation. The initial design involves a Four-Pump System (A2 design) for the FWS. A modification is proposed, removing one feed-water pump, prompting an examination of its impact on boiler reliability. Critical components are identified based on their role in potential disruptions, emphasizing parts causing immediate boiler shutdowns. Using expert knowledge and diagrams, a Reliability Block

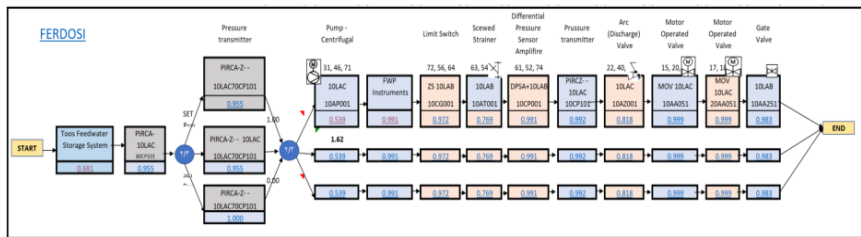
### 3 | Optimization of Design of HRSG Boilers at Cyclic ... ; Shahrokh & Farhadi

Diagram (RBD) is developed, visually highlighting weak points. The RBD assesses FWS reliability, comparing two configurations for optimization.

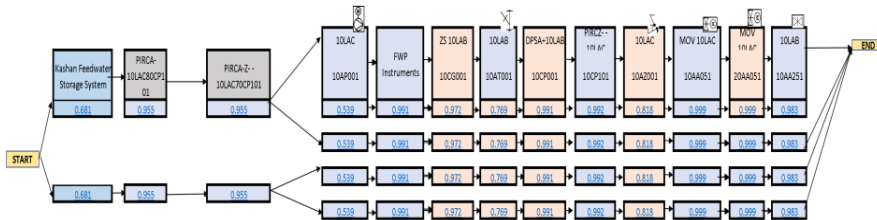
#### 3.1. Calculation of HRSG Boiler Reliability as a Multistate System

Configurations of three-pump and four-pump setups for the Feed-Water System (FWS) are illustrated and analyzed using the Reliability Block Diagram (RBD). The reliability analysis entails a detailed process of data gathering, failure rate determination, and overall reliability calculation for diverse system configurations. The study incorporates probabilities for various operational states and introduces mathematical formulations to calculate the Mean Time Between Failures (MTBF) for water feed system configurations.

**Fig1: Configuration of HRSG boiler water supply system in 3 pump mode**



**Fig2: Configuration of HRSG boiler water supply system in 4 pump mode**



#### 3.2. Steps of optimizing the operational reliability (OPR)

- Step 1: Identifying Components Used in FWS
- Step 2: Determining Failure Rates for Each Component
- Step 3: Drawing a Reliability Block Diagram (RBD)
- Step 4: Evaluating Component Reliability

Step 5: Calculating Overall Reliability for Each Configuration.

#### **4. Results**

Tables present Mean Time Between Failures (MTBF) for water feed system configurations, offering insights into the trade-offs between complete shutdowns and demi-capacity operations. The analysis suggests that the four-pump configuration, while experiencing fewer complete shutdowns, operates at half capacity more frequently compared to the three-pump configuration. The data-driven results highlight the nuances of system reliability and its dynamic nature.

#### **5. Research Findings**

The reliability assessment for boiler construction, considering the failure rates of components over a one-year period, indicates that the four-pump configuration is superior when component reliability is high; otherwise, the three-pump configuration may have an advantage. However, the decision to choose between these configurations necessitates an economic evaluation, accounting for construction costs, shutdown expenses, and half-capacity operation costs. The study underscores the importance of integrating economic considerations with reliability assessments for informed decision-making.

#### **6. Discussion and Conclusion**

This research offers valuable insights into vulnerable areas of the HRSG boiler water feeding system, guiding maintenance attention and informing decision-making processes. The study emphasizes the need for future research to consider repair times and incorporate fuzzy reliability values to enhance the robustness of reliability calculations. The holistic approach adopted in this study, combining technical assessments with economic considerations, lays the groundwork for a more comprehensive understanding of system reliability in industrial settings.

#### **7. Suggestions for Future Research**

As industries evolve, future research should tailor reliability models to specific contexts. Exploring different failure distribution functions beyond the constant-rate assumption opens avenues for investigation. Models like the Weibull mixture model, competitive risk models,


## **5 | Optimization of Design of HRSG Boilers at Cyclic ... ; Shahrokhi & Farhadi**

compound models, and hybrid models offer promising directions. For instance, the study proposes exploring the application of a compound renewal model, known as complementary risk, for systems with parallel performance and independent components. The limited exploration of this model in the literature presents an opportunity for future research to uncover its potential applications and contributions to reliability modeling.


**Keywords:** HRSG Boilers, Reliability Block Diagram (RBD), Design Optimization.

## بهینه‌سازی طراحی بویلرهای HRSG در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان،  
سنندج، ایران

\*  محمود شهرخی

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان،  
سنندج، ایران

 محمد فرهادی

### چکیده

در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تولید برق، به‌جای این که گازهای تولیدشده از سوزاندن سوخت‌های فسیلی پس از چرخاندن توربین‌های گازی به اتمسفر رها شوند، جهت تولید بخار وارد بویلرهای بازیاب می‌شوند. بخار تولیدشده توسط این بویلرها مجدداً برای تولید برق در توربین‌های بخار استفاده می‌شوند. به این ترتیب راندمان تولید برق به‌نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. بویلرهای بازیاب با صرف هزینه‌های زیاد ساخته شده و هرگونه خرابی آن‌ها موجب توقف بخشی از نیروگاه برق شده و هزینه‌های سرسام‌آوری را ایجاد می‌کنند؛ بنابراین بهینه‌سازی قابلیت اطمینان آن‌ها بسیار مهم می‌باشد. این مقاله به نحوه مدل‌سازی سیستم تغذیه آب بویلرهای بازیاب (HRSG) با ترسیم بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان در دو حالت نیمه‌بار و تمام‌بار پرداخته و به این وسیله تفاوت دو طرح پیشنهادشده برای آن‌ها را از نظر قابلیت اطمینان ارزیابی می‌کند. روش به‌کاررفته در این مقاله می‌تواند در ارزیابی و بهینه‌یابی قابلیت اطمینان بسیاری از سیستم‌های صنعتی دیگر نیز به‌کار رود.

کلیدواژه‌ها: بویلرهای HRSG، دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان (RBD)، بهینه‌سازی طراحی.

## مقدمه

از کارافتادن سیستم‌های حساس صنعتی موجب اختلال در سرویس‌دهی آن‌ها و افزایش ریسک حوادث و زیان‌های هنگفت می‌شود. از سوی دیگر با پیچیده شدن این سیستم‌ها و افزایش تعداد اجزای آن‌ها، بررسی عینی و نحوه عملکرد آن‌ها با روش‌های متعارف امری غیرممکن شده و بنابراین ارزیابی قابلیت‌اطمینان عملکرد و پیش‌بینی نحوه رفتار آن‌ها نیازمند استفاده از روش‌ها و محاسبات علمی است.

مدل دیاگرام بلوکی قابلیت‌اطمینان<sup>۱</sup> (RBD) یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی قابلیت‌اطمینان یک سیستم بر اساس قابلیت‌اطمینان اجزای تشکیل‌دهنده آن است. این مدل یک نمایش گرافیکی است که در آن هر یک از اجزای سیستم به صورت یک بلوک در نظر گرفته می‌شود. سابقه استفاده از این مدل جهت ارزیابی قابلیت‌اطمینان و تصمیم‌گیری بر مبنای نتایج آن در کشور ایران محدود بوده و این مطالعه یکی از معدود پژوهش‌های کاربردی انجام‌شده در این زمینه می‌باشد که بر اساس نیاز شرکت مینا بویلر انجام گرفته است. به نظر می‌رسد به دلیل نیاز به اطلاعات کامل و دقیق از تک‌تک اعضای سیستم موردبررسی اعم از نرخ خرابی، ارتباط بین اجزا، تحلیل دقیق ساختار طراحی و غیره، مدل دیاگرام بلوکی قابلیت‌اطمینان در این زمینه مورد استفاده قرار نگرفته است.

در این مطالعه قابلیت‌اطمینان یکی از سیستم‌های اصلی دستگاه تولید بخار (بویلر<sup>۲</sup>) در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی<sup>۳</sup> ارزیابی شده و بر اساس نتایج آن، پیکربندی بهینه این سیستم مشخص شده است.

## پیشینه پژوهش

قابلیت‌اطمینان در کنار برخی دیگر از معیارهای کیفیت دیگر همچون دسترس‌پذیری، تعمیرپذیری و ایمنی از معیارهای بیان کیفیت کاربردی یک سیستم است. استفاده از بلوک دیاگرام قابلیت‌اطمینان یکی از روش‌های مرسوم برای مدل‌سازی و محاسبه قابلیت‌اطمینان

- 
1. Reliability Block Diagram
  2. Boiler
  3. Combined cycle

سیستم‌های صنعتی است. به‌طور نمونه همدانی گلشن و همکاران (۱۳۹۲) روش RBD را جهت مدل‌سازی ساختارهای گوناگون تجهیزات اتوماسیون پست برق به کار برده‌اند. غنی‌زاده و همکار (۱۳۹۵) به بررسی قابلیت‌اطمینان توربین بادی و عملکرد آن در هنگام اتصال به شبکه برق سراسری پرداختند. سالاری و همکاران (۱۳۹۲) نیز با استفاده از درخت خطا و بلوک دیاگرام قابلیت‌اطمینان خطاهای ممکن و احتمال آن‌ها را در مجموعه یکسوکننده در سیستم تولید برق زیردریایی هوشمند را محاسبه کردند. مهدوی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش RBD قابلیت‌اطمینان یک جایگاه سوخت‌رسانی CNG را محاسبه نموده‌اند. پژوهشگرانی همچون لویتین<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) یک الگوریتم ارزیابی قابلیت‌اطمینان برای سیستم‌های پیچیده سری-موازی چندحالتی را، با در نظر گرفتن امکان انتشار خرابی، با استفاده از رویکرد تابع مولد کلی (UGF)<sup>۲</sup> ابداع کردند. آن‌ها در ادامه یک روش بلوک دیاگرام توسعه‌یافته را نیز برای انطباق با این روش توسعه دادند و به این ترتیب توانستند اثر علل خرابی مشترک را لحاظ کنند.

کوشیک<sup>۳</sup> (2015) از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی تقریبی<sup>۴</sup> برای بهبود قابلیت‌اطمینان و کاهش هزینه‌های سیستم‌های پیچیده استفاده کرد که در مقایسه با روش شبیه‌سازی مونت کارلو و بهینه‌سازی چندسطحی مختصاتی<sup>۵</sup> از عملکرد بهتری برخوردار است. کویاکزیک<sup>۶</sup> و همکاران (2015) از مدل‌های شبکه عصبی<sup>۷</sup> در تحلیل قابلیت‌اطمینان سازه‌های فولادی استفاده کردند. هدف آن‌ها شناخت انواع مختلف شبکه‌های عصبی و روش ارزیابی قابلیت‌اطمینان، توسعه تکنیک‌های بهبود با استفاده از داده‌های پیشین و همچنین نشان دادن برخی از کاربردهای تخمینی برای طراحی ساختاری و بهینه‌سازی آن بود.

- 
1. Levitin, G.
  2. Universal generating function
  3. Kaushik, B.
  4. Approximated Artificial Neural Network
  5. Multilevel Coordinate Search
  6. Chojaczyk, A. A.
  7. Artificial Neural Network



آلاسود و شیانگ<sup>۱</sup> (2017) از مدل‌های بهبودسازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط<sup>۲</sup> (CBM) برای سیستم‌های با خرابی تصادفی دارای روند رو به وخامت استفاده کردند. CBM یک استراتژی نگهداری است که اطلاعات زمان واقعی تجهیزات را جمع‌آوری و تحلیل می‌کند و تصمیمات نحوه نگهداری تجهیزات را بر اساس شرایط جاری سیستم توصیه می‌کند. اگر CBM به درستی برنامه‌ریزی شده باشد می‌تواند در بهبود قابلیت اطمینان دستگاه‌ها هم‌زمان با کاهش هزینه‌ها مؤثر باشد. بیشترین تمرکز آن‌ها بر جنبه‌های مهم CBM مانند معیارهای بهبودسازی، تناوب بازرسی و روش راه‌حل بود.

لیوو و زیو<sup>۳</sup> (2017) از داده‌های خرابی دستگاه برای ارزیابی قابلیت اطمینان و پیش‌بینی شکست آن‌ها استفاده کردند. همچنین از داده‌های خرابی تحت کنترل نیز برای مشخص کردن رفتار دستگاه‌ها، تفسیر دینامیکی ارزیابی قابلیت اطمینان و تشخیص خرابی آن‌ها نیز استفاده کردند. هدف اصلی آن‌ها ارائه یک چارچوب برای تخمین وضعیت وخامت یک سیستم متشکل از اجزای وابسته رو به وخامت و تخمین عمر مفید باقیمانده آن بوده است. لکی<sup>۴</sup> و همکاران (2017) دو روش بهبودسازی زیر را برای حل یک مسئله طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه دادند. این دو روش عبارت بودند از: (۱) روش مبتنی بر استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی و (۲) روش شبیه‌سازی نمونه کوچک. اشنايدر<sup>۵</sup> و همکاران (2017) رویکردی کارا برای تحلیل قابلیت اطمینان ساختار سیستم با در نظر گرفتن نوعی وابستگی تصادفی میان عناصر خراب ارائه دادند. آن‌ها اطلاعات ساختار خراب سیستم را از طریق بازرسی یا نظارت در ارزیابی قابلیت اطمینان به دست آورده و با کمک آن‌ها مدل بیزین خرابی سیستم را به‌روز کردند. قابلیت اطمینان سیستم به‌روز شده از طریق یکی کردن مدل خرابی به‌روز شده با مدل ساختاری احتمالی بدست آمده است. بسیاری از مسائل قابلیت اطمینان ساختارهای بزرگ از طریق شبیه‌سازی

- 
1. Alaswad, S. & Xiang, X.
  2. Condition Based Maintenance
  3. Liu, Z. & Zio, E.
  4. Lehky, D.
  5. Schneider, R.

زیرمجموعه‌های آن‌ها حل شده‌اند و برای چنین تحلیل‌هایی الگوریتم‌هایی که بر مبنای نمونه‌گیری هستند بسیار کارآمد می‌باشند. وانگ<sup>۱</sup> و همکاران (2017) رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو سه حلقه‌ای برای مدل‌سازی فیزیکی چندحالتی<sup>۲</sup> را جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ارائه داده‌اند. این مدل‌سازی یک چارچوب نیمه مارکوف مبتنی بر ساختار فیزیکی سیستم است و برای ارزیابی قابلیت اطمینان جزئی شده به کار رفته است. آن‌ها یک الگوی شبیه‌سازی مونت کارلو شامل سه مرحله زیر را ارائه کردند:

۱. شناسایی اجزای سیستم،

۲. اندازه‌گیری عدم قطعیت مدل‌های اجزای سیستم و توسعه آن‌ها در مدل

چندسطحی سیستم،

۳. انتخاب مناسب‌ترین جایگزین مدل‌سازی که تعادل بین نیازهای محاسباتی برای

حل مدل سیستم و اعتبار برآوردهای قابلیت اطمینان سیستم را برقرار می‌سازد.

پاتلی<sup>۳</sup> و همکاران (2017) روش‌های شبیه‌سازی برای قابلیت اطمینان سیستم با

استفاده از نشانه‌های دوام را ارائه داده‌اند. نشانه‌های دوام شاخص‌هایی هستند که برای انجام

محاسبات و اندازه‌گیری قابلیت اطمینان کفایت داشته و برای سیستم‌هایی کاربرد دارد که

زمان خرابی اجزای آن‌ها قابل تغییر نمی‌باشد. علائم دوام باعث کاهش چشمگیری در

اطلاعات موردنیاز می‌باشد. این مقاله به این سؤال که آیا علائم دوام اطلاعات لازم را برای

شبیه‌سازی کارا جهت استخراج توزیع زمان خرابی سیستم فراهم می‌کند یا خیر با ارائه دو

الگو برای شبیه‌سازی بر مبنای علائم دوام پاسخ مثبت می‌دهد و علاوه بر این دو الگو

الگوریتم شبیه‌سازی سومی که قابل استفاده برای تعمیر اجزا است در این مقاله ارائه می‌شود.

سارو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) میزان قابلیت اطمینان دستگاه‌های پشتیبان برق (UPS) را

بررسی نموده و با تحلیل آن روش‌های یکپارچه‌سازی ماژول‌های آن را با در نظر گرفتن

---

1. Wang, W.

2. Multi-state

3. Patelli, E.

4. Saro, L.

نقاط ضعف و قوت روش‌های مختلف کابل‌بندی و اتصال را ارزیابی نموده و به این ترتیب بهترین روش طراحی سیستم‌های توزیع برق را مشخص نمودند.

سید<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی هم‌زمان سه بُعد قابلیت اطمینان، دسترسی پذیری و تعمیرپذیری نیروگاه برق خورشیدی پرداخته و برای این منظور این سیستم را به سلسله مراتبی از زیرمجموعه‌ها تقسیم نمودند و آنگاه از یک فرم دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان بهبودیافته برای تحلیل معیارهای سه‌گانه فوق استفاده کردند. آن‌ها اطلاعات مورد نیاز خود را از جداول مربوط به آهنگ خرابی و تابع چگالی عمر قطعات استخراج نمودند و با استفاده از محاسبات احتمالی قابلیت اطمینان سیستم مورد نظر را به دست آوردند. دینگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) نیز از رویکرد تابع مولد کلی استفاده کرده و یک روش نوین را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های چندحالتی سری-موازی در مقیاس بزرگ پیشنهاد دادند. آن‌ها با مقایسه نتایج روش پیشنهادی خود با روش‌های مرسوم، کارایی محاسباتی بهتر و برتری این روش را نشان دادند.

واضح است که بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان کاربردهای متنوعی داشته و در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است، اما بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که هیچ‌گونه پژوهشی در داخل و خارج از کشور با استفاده از این تکنیک جهت مدل‌سازی قابلیت اطمینان بویلر بازیاب به‌عنوان یک سیستم چندحالتی منتشر نشده است.

### روش پژوهش

بویلرهای HRSG از چندین زیرسیستم اصلی تشکیل شده‌اند که عبارت‌اند از:

۱. سیستم ذخیره تغذیه آب (Feed-Water Storage System)

۲. سیستم تغذیه آب (Feed-Water System-FWS)

۳. سیستم فشار قوی (HP Section)

۴. سیستم فشار ضعیف (LP Section)

۵. سیستم میعان‌ساز (Condensate System)

۶. سیستم تنظیم مواد شیمیایی (Chemical Dosing System)

در این میان سیستم تغذیه آب (FWS) از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا خرابی آن به توقف فوری عملکرد بویلر و خسارت گسترده به آن منتهی می‌شود. در طرح اولیه، این سیستم دارای دو پمپ تغذیه آب اصلی بوده است که برای هر یک از آن‌ها یک پمپ جایگزین در نظر گرفته شده است. این طرح با نام سیستم چهار پمپه و یا طرح A2 شناخته می‌شود. پس از پیشنهاد تغییر در طراحی بویلر HRSG که دربرگیرنده حذف یکی از پمپ‌های تغذیه آب (با قیمت تقریبی دویست و پنجاه هزار دلار در سال 1395) بود، ضرورت بررسی اثر این تغییر بر قابلیت‌اطمینان بویلر به وجود آمد. در این راستا، مسئله این پژوهش به صورت تعیین آهنگ شکست و قابلیت‌اطمینان هر یک از اجزاء FWS و سهم هر یک از آن‌ها در شکست (خرابی) سیستم FWS تعریف گردید. از آنجاکه تنها تعداد معدودی از قطعات سیستم FWS نقش اساسی در عملکرد آن دارند، به نحوی که خرابی آن‌ها می‌تواند منجر به توقف بویلر شود، نخست این اجزاء شناسایی شده و سپس نمودار RBD با به‌کارگیری دانش کارشناسان و متخصصان طراحی و مطالعه نقشه‌های فرآیند و ابزار دقیق (P&ID<sup>1</sup>)، برای سیستم FWS ترسیم شد. این مدل خوانا بوده و محاسبات آن نقاط ضعف سیستم را به‌خوبی نشان داده و مشخص می‌کند که چه نقاطی نیازمند توجه بیشتری برای به‌سازی می‌باشد. آنگاه با استفاده از آن، قابلیت‌اطمینان سیستم FWS برای تجزیه و تحلیل و مقایسه دو گزینه پیکربندی مورد استفاده قرار گرفته است.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های به‌کارگیری RBD عدم نمایش نقش هر یک از اجزاء در خرابی سیستم کل می‌باشد. بدین معنا که این مدل برای نمایش قطعاتی که بسیار بحرانی بوده و هرگونه خرابی آن‌ها بلافاصله به توقف اضطراری (Trip) بویلر منجر می‌شوند، مناسب است. این در حالی است که برخی از قطعات تنها در زمان راه‌اندازی کاربرد دارند و بنابراین خرابی آن‌ها در حین عملکرد بویلر موجب توقف آن نمی‌شود. قطعات دیگری نیز در بویلر HRSG هستند که صرفاً جنبه ایمنی داشته و یا برای افزایش تعمیرپذیری به

بهبودسازی طراحی بویلرهای HRSG در نیروگاه‌های ...؛ شهرخی و فرهادی | ۱۳

سیستم افزوده شده‌اند. خرابی این گونه قطعات هیچ گونه اثری در عملکرد بویلر نداشته و تنها در برخی از مواقع خاص استفاده می‌شوند. همچنین، قطعات دیگری نیز هستند که خرابی آن‌ها تنها راندمان و کارایی بویلر را به‌عنوان یک مبدل حرارتی کاهش می‌دهد. بر این اساس ناگزیر براساس نقش‌های متفاوت قطعات، چندین معیار قابلیت‌اطمینان برای مدت یک سال کاری ( $24 \times 365 = 8760$  ساعت) به شرح زیر تعریف گردید:

۱. قابلیت‌اطمینان عملکرد (Operational reliability - OPR): یا به‌طور ساده همان قابلیت‌اطمینان که احتمال عدم توقف غیرمنتظره بویلر در حین کار، به سبب خرابی یکی از اجزای اصلی آن که منجر به توقف کل تولید بخار و یا کار آن در حالت نیمه‌بار شود.

۲. قابلیت‌اطمینان راه‌اندازی (Start-up reliability- SUR): احتمال راه‌اندازی بی‌نقص بویلر در آغاز کار، پس از تعمیر و یا توقفات پیش‌بینی شده. این نوع قابلیت‌اطمینان بر اساس میانگین نسبت دفعات راه‌اندازی بی‌نقص به میانگین کل دفعات اقدام برای راه‌اندازی در طول سال محاسبه می‌شود و یکی از انواع قابلیت‌اطمینان براساس نیاز (on demand) است.

۳. قابلیت‌اطمینان سیستم‌های ایمنی (Safety systems reliability - SSR): احتمال کارکرد صحیح سیستم‌های پیشگیرانه و مواجهه با حوادث در طول یک سال کاری. نمونه‌هایی از قطعات این سیستم‌ها شیرهای قطع (Shut-off valve) و شیرهای ایمنی فشار (Pressure relief valve) هستند.

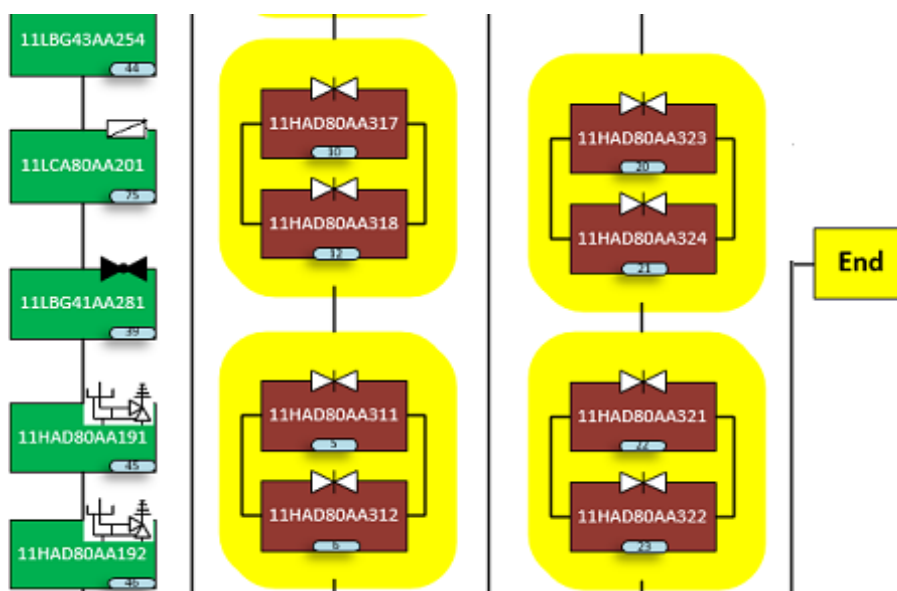
۴. قابلیت‌اطمینان سیستم‌های پشتیبان تعمیر (Maintenance Support Reliability - MSR): احتمال درستی سیستم‌هایی که در حین انجام تعمیرات استفاده می‌گردند. نمونه‌هایی از این قطعات دمپر‌ها و شیرهای ایزوله‌کننده هستند. این قابلیت‌اطمینان نیز یکی از انواع قابلیت‌اطمینان براساس نیاز (on demand) است.

۵. قابلیت‌اطمینان سیستم‌های حفظ راندمان (Performance Systems Reliability - PSR): احتمال کارکرد بویلر با کارایی مناسب در تبدیل انرژی حرارتی گاز ورودی به

انرژی گرمایی بخار. برخی از سیستم‌های ابزار دقیق کنترل دما و فشار در این دسته قرار می‌گیرند.

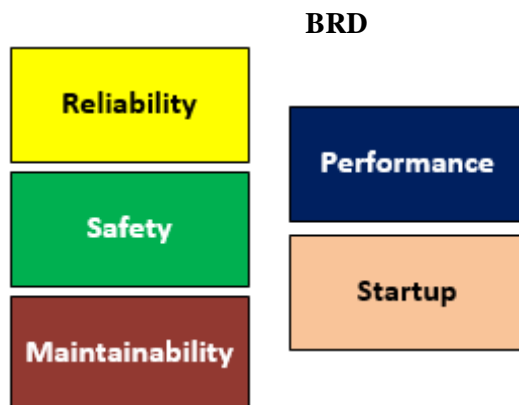
برای ایجاد تمایز نقش هر یک از این دسته قطعات در قابلیت اطمینان کل بویلر راهکارهای متفاوتی مطرح شد من جمله ترسیم یک دیاگرام بلوکی برای هر یک از انواع تعریف شده فوق بود. ولی در نهایت بهترین راهکار به صورت ترسیم همگی انواع قطعات در یک RBD انتخاب شد که با تمایز رنگ آنان نقش آن‌ها متمایز گردید (شکل ۱).

شکل ۱. بلوک دیاگرام ترسیم شده از روی نقشه‌های P&ID با تفکیک نقش قطعات



شکل ۲. راهنمای رنگ‌های مختلف نقش قابلیت اطمینانی هر قطعه را نشان می‌دهند.

شکل ۲. راهنمای رنگ‌های به‌کاررفته برای نمایش انواع نقش‌های قابلیت اطمینانی قطعات در



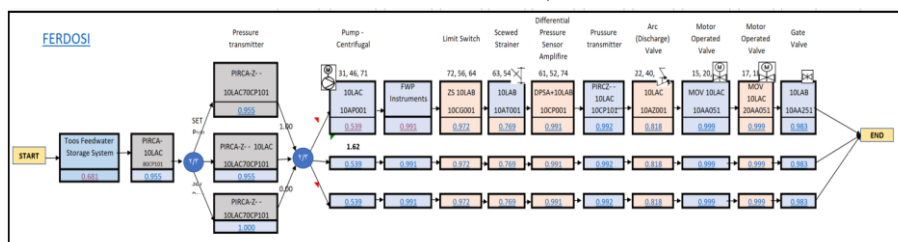
برخی از اجزاء در شکل ۱ از دو قطعه موازی تشکیل شده‌اند که سیستم برای عملکرد خود تنها نیازمند کار کردن یکی از آن‌ها است؛ به عبارت دیگر در حالت نرمال و بدون خرابی، همه اجزاء در حال فعالیت هستند و پس از رخ دادن خرابی سیستم همچنان به فعالیت خود ادامه می‌دهد تا اینکه هیچ قطعه‌ای فعال نباشد. این قطعات در کنار هم و در یک زیرمجموعه جداگانه ترسیم شده‌اند. یکی از چالش‌های استفاده از RBD به فرم رایج، ناسازگاری اطلاعات و موقعیت قطعات نشان داده شده در آن، با نقشه P&ID است. این امر باعث می‌گردد که مهندسین طراح نتوانند در ذهن خود بین اطلاعات نمودار RBD و نقشه P&ID که به‌طور روزانه با آن کار می‌کنند، رابطه برقرار نمایند. به همین سبب ضرورت یافت که برای ایجاد درک کامل تر از قطعات ترسیم شده در RBD برای کارشناسان فنی، علاوه بر کد فنی قطعات، نشانه مربوط به هر یک از آن‌ها نیز در نقشه‌های P&ID در بلوک دیاگرام ترسیم گردد.

محاسبه قابلیت اطمینان بویلر HRSG به‌عنوان یک سیستم چندحالتی

در اشکال ۳ و ۴ پیکربندی‌های سه‌پمپه و چهارپمپه برای FWS نشان داده شده است که در آن اعداد مربوط به قابلیت اطمینان هر قطعه با رنگ آبی در زیر آن نشان داده شده است. از آنجا که در این مقاله تنها قابلیت اطمینان عملکرد مورد بحث قرار گرفته شده است نیازی

به تفکیک قطعات با رنگ‌های نشان داده‌شده در شکل ۲ وجود نداشته و از این پس رنگ قطعات در دیاگرام‌های بلوکی به دلخواه نمایش داده شده‌اند.

شکل ۳. پیکربندی سیستم تغذیه آب بویلر HRSG در حالت ۳ پمپ

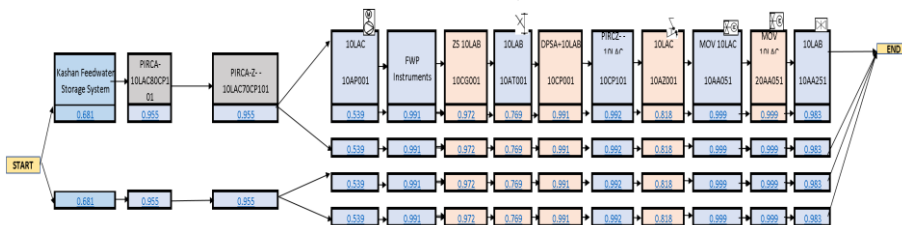


بلوک دیاگرام نشان داده‌شده در شکل ۳ از چندین بخش تشکیل شده است. در سمت چپ نمودار نخست دو مجموعه سیستم تغذیه آب و یک مجموعه ابزار دقیق به صورت سری قرار گرفته‌اند. سپس سه مجموعه ابزار دقیق مشابه به صورت ترکیب ۲ از ۳ در نظر گرفته شده‌اند، بدین معنا که برای عملکرد سیستم، در بین آن‌ها باید دو عدد سالم باشند. این مجموعه برای اندازه‌گیری فشار آب فراداغ، مهم‌ترین پارامتر اندازه‌گیری شده در بویلر به کار می‌رود و برای افزایش اطمینان فشار اندازه‌گیری شده توسط هر سه مجموعه در یک کنترلر مقایسه می‌گردد و زمانی که حداقل دو عدد از آن‌ها شرایط ایمن را نشان دهند، شرایط نرمال تلقی شده و بویلر به کار خود ادامه می‌دهد. همچنین در سمت راست نمودار، مجموعه‌ی ۳ خط پمپ تغذیه آب و ملحقات آن نشان داده شده است که هر یک شامل ۱۰ قطعه می‌باشد که با یکدیگر به صورت سری قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه ظرفیت هر یک از این پمپ‌ها به میزان پنجاه درصد ظرفیت نامی بویلر است، در صورتی که حداقل ۲ عدد از آن‌ها به درستی کار کنند، بویلر می‌تواند با ظرفیت نامی خود بخار تولید کند. همچنین چنانچه تنها یکی از آن‌ها سالم باشد، بویلر می‌تواند با ظرفیت نیمه‌بار کار کند و تنها اگر هر سه خط به طور هم‌زمان متوقف شوند، کل سیستم تغذیه آب و در نتیجه کل بویلر متوقف می‌گردد.



پیکربندی چهارپمپه نیز در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. در این نمودار ۴ خط پمپ تغذیه به صورت دو مجموعه موازی نشان داده شده‌اند که هر یک شامل یک خط تغذیه اصلی و یک خط تغذیه افزونه است. همان‌طور که در سمت چپ این نمودار نشان داده شده است، با خرابی هر دوی خطوط اصلی و افزونه تغذیه در هر مجموعه، نیمی از ظرفیت تولید بخار بویلر از دست می‌رود. برای هر یک از این مجموعه‌های دوتایی پمپ تغذیه آب، به صورت سری مجموعه‌های ابزار دقیق و سیستم ذخیره آب اختصاصی در نظر گرفته شده است.

شکل ۴. پیکربندی سیستم تغذیه آب بویلر HRSG در حالت ۴ پمپه



با توجه به توضیحات فوق، در ادامه گام‌های انجام مطالعه بهینه‌سازی قابلیت‌اطمینان عملکرد (OPR) سیستم تغذیه آب بویلر HRSG توضیح داده می‌شوند.

### گام ۱. شناسایی قطعات مورداستفاده در FWS

نخست تمام اطلاعات مربوط به بویلر موردنظر که برای ارزیابی قابلیت‌اطمینان موردنیاز است جمع‌آوری گردید. این اطلاعات به‌طور کلی شامل مواردی نظیر نقشه‌های P&ID، اسناد فنی و دستورالعمل‌های سرویس و نگهداری بویلر می‌باشد.

### گام ۲. تعیین آهنگ شکست هر قطعه

قطعات بویلر به دو دسته تقسیم‌بندی شدند. دسته اول بویلرهایی که آهنگ شکست آن‌ها در مرجع (© OREDA 2002) وجود داشت و با استفاده از این مرجع آهنگ شکست

قطعات استخراج گردید و دسته دوم قطعاتی که آهنک شکست آن در مراجع فوق وجود نداشته و با استفاده از آمار خرابی قطعاتی که از سابقه سیستم‌های مشابه جمع‌آوری شده و یا با استفاده از نظرات افراد خبره و کارشناسان تخمین زده شدند.

از آنجا که اطلاعاتی در مورد پیشینه خرابی تجهیزات در دسترس نبود برای دستیابی به آهنک خرابی تجهیزات با شرکت خارجی تهیه‌کننده آن‌ها مکاتبه شد که آن‌ها توصیه به استفاده از کتابچه‌های استاندارد نمودند. به این ترتیب از آهنک خرابی تجهیزات مستخرج از این کتابچه‌ها با تائید کارشناسان طراحی مکانیک، مهندسی شیمی و کنترل و ابزار دقیق استفاده شد. شکل ۵ مربوط به پایگاه داده آهنک خرابی تجهیزات در محیط Excel را نشان می‌دهد. در جدول نشان داده شده در این شکل، هر سطر مربوط به یک تجهیز می‌باشد. ستون‌های زردرنگ مرجع اطلاعات را به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین آهنک خرابی آن‌ها را بر طبق استانداردهای در دسترس نشان می‌دهد. در اولین ستون زردرنگ برای تجهیزاتی که آهنک خرابی آن‌ها در مرجع OREDA وجود داشت، حرف O، تجهیزاتی که آهنک خرابی آن‌ها با استفاده از آمار خرابی سازمان انرژی اتمی محاسبه شده است حرف R و تجهیزاتی که آهنک خرابی آن‌ها از مرجع IEEE ۵۰۰ استخراج شده است حرف I قرار داده شد. همچنین اعداد ذکر شده در کنار این حروف نشان‌دهنده صفحه‌ای از مرجع موردنظر است که اطلاعات از آنجا استخراج شده است. چنانچه اطلاعات یک تجهیز در دو استاندارد متفاوت موجود بود، این اطلاعات در ستون‌های زردرنگ و سبز رنگ درج شده‌اند. در این پژوهش از میانگین ارائه شده توسط استاندارد OREDA به عنوان بهترین برآوردگر نقطه‌ای آهنک خرابی استفاده شده است. آهنک 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

بهبودسازی طراحی بویلرهای HRSG در نیروگاه‌های ...؛ شهرخی و فرهادی | ۱۹

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 به هنگام می‌کند.

شکل ۵. پایگاه داده آهنگ خرابی تجهیزات

Equipment	R=IAEA-TECDOC-478				I=IEEE 500				2				Reliability (1 year)	
	Reference	Lower	Mean	Upper	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

### ترسیم دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان (RBD)

در این گام، بر اساس اطلاعات P&ID نحوه چیدمان بلوک‌ها بر اساس منطق عملیاتی و درک عمیق از الزامات عملکرد آن‌ها در کنار یکدیگر به صورت سری و یا موازی رسم شدند. مفروضات زیر برای ترسیم RBD در نظر گرفته شده‌اند:

- با فرض تابع چگالی احتمال خرابی با توزیع نمایی، آهنگ شکست ( $\lambda$ ) برای یک قطعه در طول عمر مفید آن ثابت است.
- از دیدگاه احتمالی، خرابی هر بلوک مستقل از خرابی سایر بلوک‌ها است.
- آهنگ خرابی هر بلوک به صورت متمایز قابل شناسایی است.

گام ۳. ارزیابی قابلیت اطمینان هر قطعه

در این گام، با استفاده از آهنگ خرابی تخمینی هر قطعه از گام قبل، قابلیت اطمینان آن با استفاده از رابطه ذیل محاسبه گردید:

$$R_k = e^{-\lambda_k t} \quad (1)$$

در رابطه فوق از نشانه‌های زیر استفاده شده است:

$R_k$ : قابلیت اطمینان قطعه  $k$  (احتمال عدم رخداد خرابی در یک سال پیوسته (۸۷۶۰ ساعت))

$t$ : زمان مطالعه (۸۷۶۰ ساعت)

$\lambda_k$ : آهنگ شکست قطعه  $k$  (تعداد مورد انتظار خرابی بر ساعت)

در ادامه نشانه‌ها و معادلات مدل ریاضی تدوین شده برای انجام محاسبات قابلیت اطمینان تشریح می‌گردد.

#### اندیس‌ها

- I گزینه‌های پیکربندی ( $i=1, 2$ )
- J زیرسیستم‌های هر گزینه پیکربندی ( $i=1, 2$ ), ( $j = 1, 2, S^i$ )
- K قطعه

#### علائم و نشانه‌ها

- $R_S^i$  قابلیت اطمینان کل سیستم برای گزینه پیکربندی  $i$  ام
- $S^i$  مجموعه زیرسیستم‌های گزینه پیکربندی  $i$  ام
- $S_j^i$  زیرسیستم  $j$  ام از گزینه پیکربندی  $i$  ام
- $R_{S_j^i}$  قابلیت اطمینان زیرسیستم  $j$  ام از گزینه پیکربندی  $i$  ام
- $R_k$  قابلیت اطمینان قطعه  $k$  ام
- $R^i$  قابلیت اطمینان کل گزینه پیکربندی  $i$

**گام ۴.** محاسبه‌ی قابلیت اطمینان کل برای هر یک از پیکربندی‌های پیشنهادی در این گام با دانستن قابلیت اطمینان هر قطعه و فرمول‌های ذیل قابلیت اطمینان کل هر یک از پیکربندی‌های پیشنهادی محاسبه می‌شود.

بهبودسازی طراحی بویلرهای HRSG در نیروگاه‌های ...؛ شهرخی و فرهادی | ۲۱

چنانچه مجموعه قطعات زیرسیستم  $S_j^i$  با یکدیگر به صورت سری قرار گرفته باشند و قابلیت اطمینان قطعه  $k$  ام ( $k \in S_j^i$ ) برای کار تا زمان  $t$  برابر  $R_k(t)$  باشد، آنگاه قابلیت اطمینان کل این زیرمجموعه تا زمان  $t$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{S_j^i}(t) = \prod_{k \in S_j^i} R_k(t) \quad (2)$$

و چنانچه همان قطعات به صورت موازی نسبت به هم قرار گرفته باشند، آنگاه قابلیت اطمینان کل این زیرمجموعه تا زمان  $t$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{S_j^i}(t) = 1 - \left( \prod_{k \in S_j^i} (1 - R_k(t)) \right) \quad (3)$$

در سیستم تغذیه آب بویلر HRSG، خطوط پمپ تغذیه آب به صورت ترکیب ۲ از ۳ قرار گرفته‌اند، به نحوی که چنانچه حداقل ۲ خط از ۳ خط سالم باشند، بویلر می‌تواند با ظرفیت کامل کار می‌کند. چنانچه تنها یکی از ۳ خط سالم باشند، بویلر با ظرفیت نیمه‌بار کار کرده و چنانچه هیچ‌یک از ۳ خط سالم نباشند بویلر متوقف خواهد شد. چنانچه قابلیت اطمینان همه‌ی خطوط تا زمان  $t$  یکسان و برابر  $R(t)$  باشد، آنگاه احتمال هر یک از حالات فوق در جدول زیر نشان داده شده است:

جدول ۱. روابط محاسبه احتمال حالات مختلف ۳ قطعه با ترکیب ۲ از ۳

ردیف	حالت	احتمال	ظرفیت
۱	سالم بودن هر ۳ خط	$R^3$	ظرفیت تمام
۲	سالم بودن ۲ خط و خراب بودن یک خط	$\binom{3}{2} R^2 (1 - R) = 3R^2(1 - R)$	
۳	سالم بودن تنها ۱ خط و خراب بودن دو خط	$\binom{3}{2} R(1 - R)^2 = 3(R(1 - R)^2)$	ظرفیت نیمه‌بار
۴	خرابی هر ۳ قطعه	$(1 - R)^3$	توقف سیستم

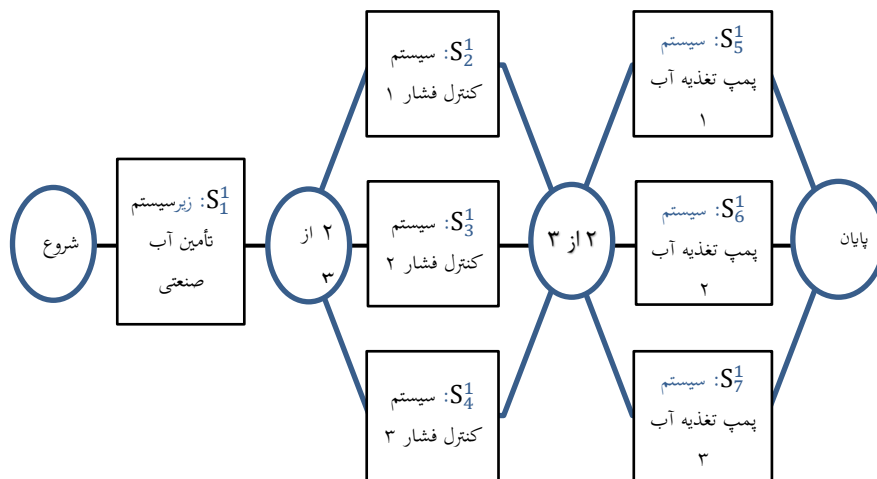
به این ترتیب احتمال کار با تمام ظرفیت، از مجموع دو ردیف اول جدول فوق، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P(\text{Full capacity}) = -2R^3 + 3R^2 \quad (۴)$$

ولی چنانچه مقدار قابلیت اطمینان قطعات ۳ خط فوق با یکدیگر متفاوت باشد تنها راه محاسبه احتمال حالات مختلف، محاسبه احتمالات مربوط به همه جایگشت‌های مربوط به خرابی قطعات می‌باشد.

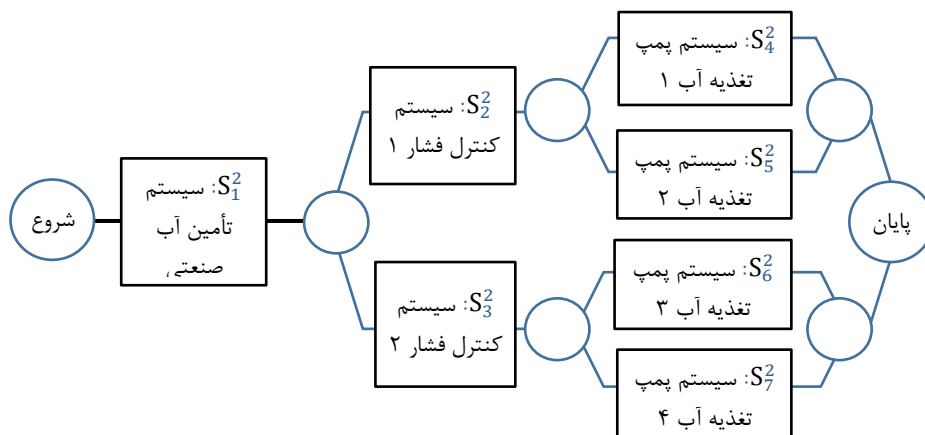
در این پژوهش، نخست قابلیت اطمینان مجموعه‌ی قطعات سری با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه شده و سپس همه جایگشت‌های مربوط به خرابی سه مجموعه حاصل و اثر آن بر وضعیت سیستم (توقف، کار در حالات نیمه بار و تمام بار)، با کمک درخت رخدادها در نظر گرفته شده و از روی آن قابلیت اطمینان سیستم محاسبه شده است. پس از محاسبه قابلیت اطمینان دو مجموعه قطعات سری از طریق ضرب قابلیت اطمینان تک تک آن‌ها در یکدیگر، شامل (۱) پمپ‌های تغذیه آب و ملحقات آن‌ها (که مجموعاً زیرسیستم تغذیه آب را می‌سازند) و (۲) سیستم ذخیره آب و قطعات ابزار دقیق مجاور آن (که مجموعاً زیرسیستم تأمین آب را می‌سازند)، فرم هر دو پیکربندی به صورت ساده شده در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

شکل ۶. گزینه پیکربندی ۳ پمپه (A<sub>1</sub>) پیشنهادی برای سیستم تغذیه آب بویلر



در این اشکال قابلیت اطمینان همه‌ی زیرمجموعه‌هایی که از بلوک‌های سری در RBD تشکیل شده بودند از طریق ضرب بلوک‌های آن‌ها به دست آمده و زیرمجموعه‌ها نیز به کدی شامل حروف و اعداد نام گذاری شده‌اند.

شکل ۷. گزینه پیکربندی ۴ پمپه (A<sub>2</sub>) پیشنهادی برای سیستم تغذیه آب بویلر

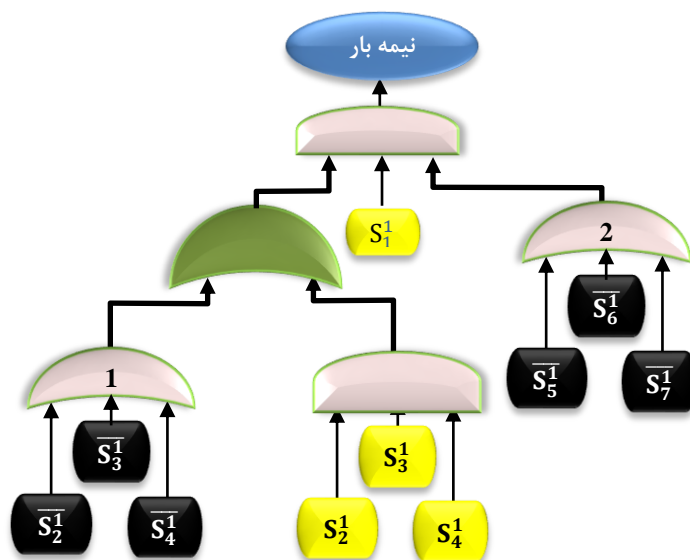


هر یک از حالات عملیاتی بار کامل، نیمه‌بار و یا توقف کامل می‌تواند در اثر ترکیبات گوناگونی از خرابی بلوک‌ها حاصل شود که با توجه به تعدد این ترکیبات برای محاسبه احتمالات هر حالت لازم است که درخت خطا از روی RBD مربوطه ترسیم شود.

به‌طور نمونه درخت خطا برای حالت نیمه‌بار در پیکربندی سه پمپه به‌صورت زیر

خواهد بود:

شکل ۸. درخت خطای مربوط به حالت نیمه‌بار در حالت ۳ پمپه

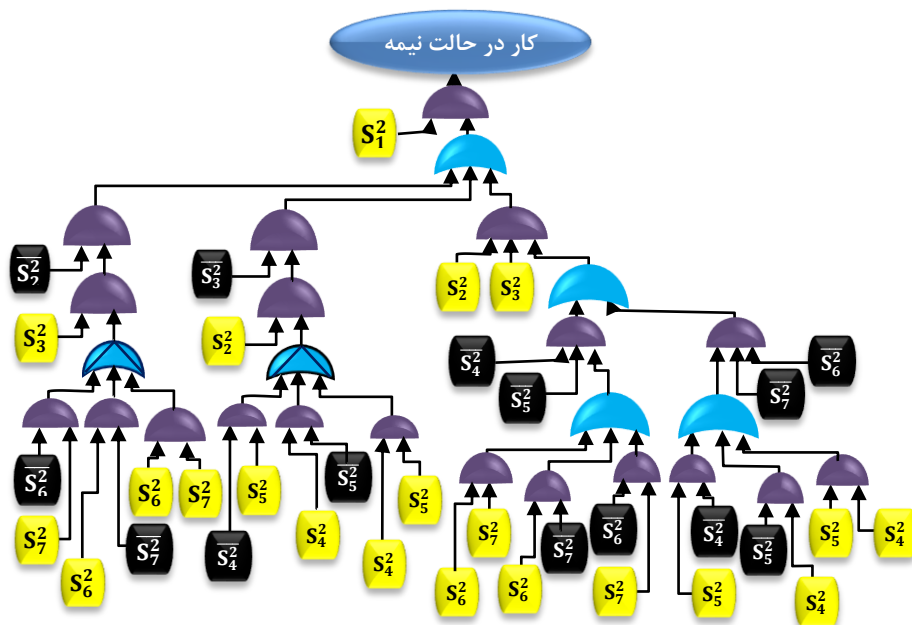


همچنین درخت خطا برای رخداد کار نیمه‌بار برای حالت چهار پمپه در شکل زیر نشان

داده شده است:



شکل ۹. درخت خطای مربوط به حالت نیمه‌بار در حالت ۴ پمپه



در دو شکل فوق حالت خرابی هر یک از زیرمجموعه‌ها با بلوک‌های به رنگ سیاه و با ترسیم یک خط بالای نام کد زیرمجموعه مذکور نشان داده شده است. به همین ترتیب درخت خطا برای حالات توقف کامل بویلر نیز ترسیم و براساس آن‌ها کل احتمالات مربوطه محاسبه گردید. برای مقایسه قابلیت اطمینان پیکربندی‌های مختلف دو نوع قابلیت اطمینان زیر محاسبه شده است:

- قابلیت اطمینان عدم توقف (**RNT (Non-Trip Reliability)**): احتمال این که بویلر به‌خاطر خرابی قطعات آن توقف کامل (**Trip**) نکند.
- قابلیت اطمینان نیمه‌بار (**RDC (Demi-Capacity Reliability)**): احتمال این که تنها یکی از خطوط ۵۰٪ تغذیه آب سالم باشد و بنابراین بویلر با نصف ظرفیت (نیمه‌بار) کار کند.

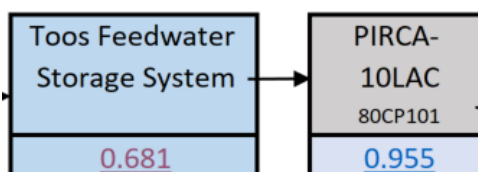
میانگین فاصله زمانی بین دو خرابی متوالی ( $MTBF^1$ ) که برحسب سال بیان شده است به عنوان یک شاخص مناسب برای مقایسه قابلیت اطمینان طرح‌های مختلف استفاده شده است. بدیهی است که بالا بودن  $MTBF$  یک پیکربندی، برای آن یک مزیت محسوب می‌شود. پس از محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از پیکربندی‌های پیشنهادی، می‌توان میانگین فاصله بین دو خرابی متوالی آن‌ها را برحسب سال را نیز از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$MTBF = \left( \ln(R_{S_j^i}) \right)^{-1} \quad (5)$$

### محاسبات قابلیت اطمینان

ساختار زیرمجموعه  $S_1^1$  به صورت زیر است:

شکل ۱۰. بلوک دیاگرام زیرمجموعه  $S_1^1$

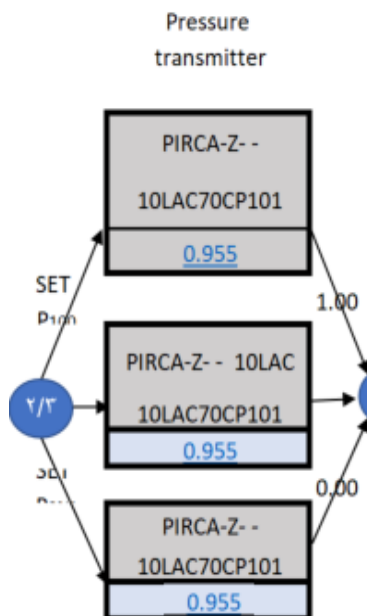


این زیرمجموعه‌ها به نام سیستم  $S_1$  شناخته شده و قابلیت اطمینان آن برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$R_{S_1} = 0.681 * 0.955 = 0.650 \quad (6)$$

ساختار حاصل از زیرمجموعه‌های  $S_2^1, S_3^1, S_4^1$  که با نام  $S_2$  شناخته می‌شود، به صورت زیر است:

شکل ۱۱. بلوک دیاگرام زیرمجموعه‌های  $S_2^1, S_3^1$  و  $S_4^1$

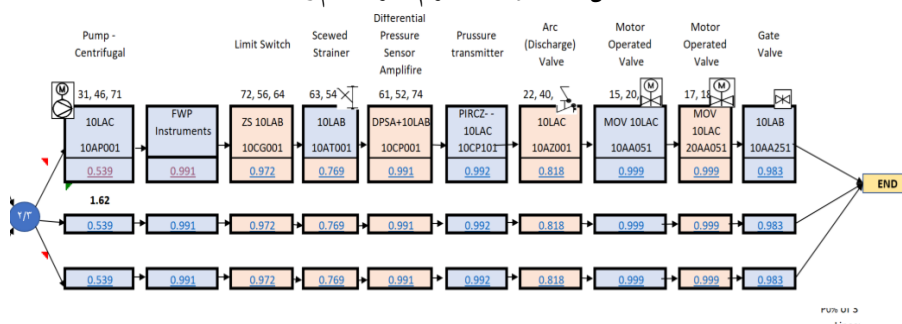


که با توجه به این که سلامت حداقل دو عدد از آن‌ها برای عملکرد سیستم لازم است، قابلیت اطمینان آن برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$R_{S_2} = (0.955)^3 + \binom{3}{2} (0.955)^2 * 0.045 = 0.994 \quad (7)$$

ساختار 3کنیز که از زیرمجموعه‌های  $S_5^1, S_6^1$  و  $S_7^1$  به دست می‌آید، به صورت زیر است:

شکل ۱۲. بلوک دیاگرام زیرسیستم  $S_3$



این زیرسیستم مربوط به سیستم‌های پمپ تغذیه آب می‌باشد که شامل سه عدد سیستم یکسان پمپ هستند که با کارکرد تنها ۲ عدد از آن‌ها بویلر می‌تواند با ظرفیت کامل کار کند. برای محاسبه قابلیت اطمینان آن، ابتدا قابلیت اطمینان هر سیستم پمپ تغذیه آب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{S_3^1} = 0.539 * 0.991 * 0.972 * 0.769 * 0.991 * 0.992 * 0.818 * 0.999 * 0.999 * 0.983 = 0.315 \quad (۸)$$

بنابراین قابلیت اطمینان کل زیرسیستم  $S_3$  برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$R_{S_3} = (R_{S_3^1})^3 + \binom{3}{2} (R_{S_3^1})^2 * (1 - R_{S_3^1}) \quad (۹)$$

$$R_{S_3} = (0.315)^3 + \binom{3}{2} (0.315)^2 * (1 - 0.315) = 0.235 \quad (۱۰)$$

بنابراین قابلیت اطمینان سیستم کل تغذیه آب بویلر HRSG به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_S = R_{S_1} * R_{S_2} * R_{S_3} \quad (۱۱)$$

$$R_S = 0.650 * 0.994 * 0.235 = 0.152 \quad (۱۲)$$

### تحلیل محاسبات قابلیت اطمینان

مقادیر MTBF برای سیستم تغذیه آب در دو پیکربندی سه پمپه (2 of 3) و چهار پمپه ((1 of 2)\*2) به ازای مقادیر مختلف قابلیت اطمینان پمپ تغذیه آب (با فرض این که سایر قطعات قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ دارند)، در جدول ۲ نشان داده شده است که در آن:

- ستون اول سمت چپ قابلیت اطمینان فرضی یک پمپ (احتمال عدم خرابی آن در یک سال) را نشان می‌دهد.
- ستون دوم مقدار میانگین فاصله زمانی بین دو خرابی متوالی (MTBF) محاسبه شده برای یک پمپ را به ازای هر یک از مقادیر ستون اول نشان می‌دهد.
- ستون‌های دوم و سوم از سمت چپ، به ترتیب مقادیر قابلیت اطمینان عدم توقف (Trip) و نیمه بار را برای حالت سه پمپه نشان می‌دهند.

بهبودسازی طراحی بویلرهای HRSG در نیروگاه‌های ...؛ شهرخی و فرهادی | ۲۹

• ستون‌های چهارم و پنجم از سمت چپ، به ترتیب مقادیر قابلیت اطمینان عدم توقف (Trip) و نیمه‌بار را برای حالت چهار پمپه نشان می‌دهند.

جدول ۲. مقایسه MTBF سیستم تغذیه آب در دو حالت سه پمپه (۲ of 3) و چهار پمپه (۲)\* (۱ of 2) به ازای مقادیر مختلف قابلیت اطمینان پمپ تغذیه آب

Reliability of other components=1						
(For 1 year)	R <sub>FWP</sub>	MTBF <sub>FWP</sub> (year)	MTBF (years)			
			A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			SD*	DC <sup>#</sup>	SD*	DC <sup>#</sup>
0.8		4.5	124.5	9.9	624.5	12.5
0.85		6.2	295.8	16.9	1974.8	22.2
0.9		9.5	999.5	36.5	9999.5	50.0
0.91		10.6	1371.2	44.7	15241.0	61.7
*: Shutdown						
#: Demi-capacity						

به‌طور مثال محاسبات نشان می‌دهد که در این حالت اگر قابلیت اطمینان هر سیستم پمپ تغذیه آب ۰/۸ باشد (یعنی میانگین فاصله زمانی بین دو خرابی متوالی آن ۴/۵ سال باشد)، آنگاه به‌طور متوسط در پیکربندی سه پمپه هر ۱۲۴/۵ سال سیستم یک بار توقف کامل داشته و هر ۹/۹ سال یک بار بویلر با ظرفیت ۵۰٪ کار خواهد کرد. این در حالی است که برای پیکربندی چهار پمپه این زمان‌ها به ترتیب ۶۲۴/۵ (۵ برابر حالت سه پمپه) و ۱۲/۵ سال خواهد بود. چون در تمامی حالات متوسط زمان‌های بین دو خرابی برای حالت چهار پمپه بیشتر است پس اگر قابلیت اطمینان سایر اجزاء ۱۰۰٪ فرض شود همواره حالت چهار پمپه بر حالت سه پمپه ارجحیت مطلق خواهد داشت. البته در هر دو حالت، توقف هر چند صدسال یک‌بار رخ می‌دهد.

در ادامه مقادیر قابلیت اطمینان سایر قطعات را تغییر داده و اثر آن را بر قابلیت اطمینان کل سیستم بررسی می‌کنیم. جدول ۳ مقادیر MTBF را برای سیستم تغذیه آب در دو پیکربندی سه پمپه (A<sub>1</sub>) و چهار پمپه (A<sub>2</sub>) به ازای مقادیر مختلف قابلیت اطمینان پمپ تغذیه آب، با فرض این‌که هر یک از سایر قطعات قابلیت اطمینان ۸۰٪ دارند را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه MTBF سیستم تغذیه آب در دو حالت سه پمپه (A<sub>1</sub>) و چهار پمپه (A<sub>2</sub>)، به ازای مقادیر مختلف قابلیت اطمینان پمپ تغذیه آب

Reliability of other components=0.8				
System Reliability	MTBF (years)			
	(A <sub>1</sub> )		(A <sub>2</sub> )	
	SD*	DC <sup>#</sup>	SD*	DC <sup>#</sup>
0.8	0.6	6.0	0.7	4.0
0.85	0.6	5.7	0.7	3.7
0.9	0.6	5.5	0.8	3.6
0.91	0.6	5.4	0.8	3.5
0.92	0.6	5.4	0.8	3.5
0.93	0.6	5.3	0.8	3.5
0.94	0.6	5.3	0.8	3.4
0.95	0.6	5.3	0.8	3.4
0.96	0.6	5.2	0.8	3.4
0.97	0.6	5.2	0.8	3.3
0.98	0.7	5.2	0.8	3.2
0.99	0.7	5.1	0.8	3.3
1	0.7	5.1	0.8	3.2

\*: Shutdown  
#: Demi-capacity

همچنین نتایج درج شده در این جدول نشان می دهد، اگرچه که در حالت فوق همواره رخداد توقف کامل برای حالت چهار پمپه نسبت به حالت سه پمپه بسیار کمتر اتفاق می افتد ولی در مقابل، حالت کار بویلر در حالت نیمه بار بیشتر رخ می دهد. بنابراین، اگر قابلیت اطمینان هر یک از سایر قطعات ۸۰٪ فرض شود، حالت چهار-پمپه از نظر عدم وقوع توقف کامل بهتر و از نظر قابلیت اطمینان کار نیمه بار بدتر از حالت سه پمپه خواهد بود. البته در هر دو حالت به طور انتظاری، توقف کامل هر ساله رخ می دهد.

### یافته‌های پژوهش

ارزیابی قابلیت اطمینان جهت ساخت بویلر با توجه به آهنگ شکست قطعات برای مدت زمان یک سال برآورد گردید و بر اساس مقادیر محاسبه‌شده، مشخص شد که اگر قابلیت اطمینان قطعات بالا باشد حالت چهار پمپه و در غیر این صورت حالت سه پمپه می‌تواند برتری داشته باشد. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب هریک از این پیکربندی‌ها نیاز به ارزیابی اقتصادی در مورد هزینه‌های ساخت و هزینه‌های توقف و کار نیمه‌بار دارد. با توجه به عدم قطعیت اطلاعات به‌دست‌آمده از جداول استاندارد OREDA برای تخمین آهنگ خرابی قطعات در شرایط عملکردی کشور ایران، برای پژوهش‌های آتی می‌توان از سوابق خرابی این قطعات در نیروگاه و یا مقادیر قابلیت اطمینان فازی برای انعکاس نظر خبرگان در زمینه آهنگ خرابی این قطعات نیز استفاده نمود.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مسئله محاسبه قابلیت اطمینان سیستم تغذیه آب بویلر HRSG مورد نظر قرار گرفت. برای این منظور ابتدا بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان برای سیستم مورد نظر ترسیم شده و سپس سیستم اصلی به سه زیرسیستم سری تقسیم‌شده و قابلیت اطمینان تک‌تک این زیرسیستم‌ها محاسبه شده است. در آخر قابلیت اطمینان کل سیستم از حاصل ضرب این قابلیت اطمینان‌ها محاسبه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که کدام بخش از سیستم آسیب‌پذیرتر بوده و برای نگهداری و تعمیرات باید توجه بیشتری به آن نمود. برای پژوهش‌های آتی می‌توان با در نظر گرفتن زمان تعمیرات سیستم به محاسبه دسترسی‌پذیری سیستم پرداخت. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن عدم قطعیت قابلیت اطمینان از مقادیر قابلیت اطمینان فازی برای محاسبات استفاده نمود.

### پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی

در پژوهش حاضر فرض بر این است که خرابی تجهیزات از توزیع نمایی با نرخ ثابت پیروی می‌کند. برای استفاده از این تحقیق در پژوهش‌های آتی، اگر برای انطباق با صنعت موردنظر و نیز شرایط خاص هر تجهیز نیاز باشد که تابع توزیع خرابی تجهیزات متفاوت در نظر گرفته شود، می‌توان با اعمال تغییراتی از پژوهش حاضر استفاده نمود. مدل‌های قابل استفاده برای در نظر گرفتن چندین نرخ خرابی بدین شرح می‌باشند (گیلبرتو و هانگ<sup>۱</sup> (۲۰۱۲)): مدل وایبل مخلوط<sup>۲</sup>، مدل ریسک رقابتی<sup>۳</sup>، مدل‌های ضربی<sup>۴</sup> و مدل‌های ترکیبی<sup>۵</sup>. برای مثال، یک مدل ضربی  $n$ -برابر که به آن ریسک مکمل نیز گفته می‌شود بدین صورت قابل نمایش است:

$$F(t) = \prod_{i=1}^t F_i(t) \quad (13)$$

این مدل را می‌توان در زمینه مدل‌سازی یک سیستم با عملکرد موازی با اجزای مستقل استفاده کرد، اما برخلاف مدل ریسک رقابتی، این مدل در ادبیات توجه بسیار کمی را به خود جلب کرده است.

### تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

### ORCID

Mahmoud Shahrokhi  
Mohammad Farhadi



<http://orcid.org/0000-0002-2224-5901>



<http://orcid.org/0000-0002-8217-0024>

1. Gilberto, F. & Hoang, P.
2. Weibull Mixture Model
3. Competing Risk Model
4. Multiplicative models
5. Composite Models



## منابع

۱. سالاری، سعید، کرباسیان، مهدی، نیلی پور، اکبر، خیامباشی، بیژن. (1392). تحلیل قابلیت اطمینان مجموعه یکسوکننده در سیستم تولید برق زیردریایی هوشمند با استفاده از روش درخت خطا. *اولین همایش ملی سامانه‌های هوشمند دریایی*. مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری‌های زیردریا. شاهین شهر. <https://civilica.com/doc/236797>
۲. غنی زاده، مهدی، پولادی، جابر. (1395). بررسی عملکرد قابلیت اطمینان توربین بادی متصل به شبکه مبتنی بر روش بلوک دیاگرام. *دومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در علوم، مهندسی و فناوری، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری-دانشگاه صنعتی اصفهان-دانشکده برق و کامپیوتر*. <https://civilica.com/doc/550435>
۳. مهدوی، شهناز، میری لواسانی، سیدمحمدرضا. (1393). ارزیابی قابلیت اطمینان جایگاه سوخت‌رسانی CNG به روش دیاگرام بلوکی. *سلامت کار ایران*. ۳. ۲۲-۲۹. <https://ioh.iums.ac.ir/article-1-1049-fa.html>
۴. همدانی گلشن، محمد اسماعیل، حقی فام، محمود رضا، شایانفر، حیدر علی، حاجیان حسین آبادی، حمزه. (1392). مدل‌سازی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های اتوماسیون پست. *وزارت علوم، تحقیقات و فناوری-دانشگاه صنعتی اصفهان-دانشکده مهندسی برق و الکترونیک*. <https://library.iut.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=8115> و <https://library.iut.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=8115&DTC=107Field&=0>

## References

5. Alaswad, S., & Xiang, Y. (2017). A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.009>
6. Chojaczyk, A. A., Teixeira, A. P., Neves, L. C., Cardoso, J. B., & Soares, C. G. (2015). Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures. *Structural Safety*, 52, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.09.002>
7. Ding, Y., Lin, Y., Peng, R., & Zuo, M. J. (2019). Approximate Reliability Evaluation of Large-Scale Multistate Series-Parallel Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 68(2), 539-553. <https://doi.org/10.1109/TR.2019.2898459>

8. Gilberto, F., & Hoang, P. (2012). Thermal Power Plant Performance Analysis. *Springer Series in Reliability Engineering*, ISBN 978-1-4471-2308-8. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2309-5>
9. Kaushik, B., & Banka, H. (2015). Performance evaluation of approximated artificial neural network (AANN) algorithm for reliability improvement. *Applied Soft Computing*, 26, 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.10.002>
10. Lehký, D., Slowik, O., & Novák, D. (2017). Reliability-based design: Artificial neural networks and double-loop reliability-based optimization approaches. *Advances in Engineering Software*, 117, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.06.013>
11. Levitin, G., & Xing, L. (2010). Reliability and performance of multi-state systems with propagated failures having selective effect. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6), 655-661. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.02.003>
12. Liu, J., & Zio, E. (2017). System dynamic reliability assessment and failure prognostics. *Reliability Engineering & System Safety*, 160, 21-36. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.12.003>
13. Patelli, E., Feng, G., Coolen, F. P., & Coolen-Maturi, T. (2017). Simulation methods for system reliability using the survival signature. *Reliability Engineering & System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.06.018>.
14. Saro, L., Zanettin, C., & Božič, V. (2018). Reliability Analysis and Calculations for Different Power System Architectures based on Modular UPS. *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2018.8612341>
15. Sayed, A., El-Shimy, M., El-Metwally, M., & Elshahed, M. (2019). Reliability, Availability and Maintainability Analysis for Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems. *Energies*, 12(7), 12-13. <https://doi.org/10.3390/en12071213>
16. Schneider, R., Thöns, S., & Straub, D. (2017). Reliability analysis and updating of deteriorating systems with subset simulation. *Structural Safety*, 64, 20-36. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.09.002>
17. Wang, W., Di Maio, F., & Zio, E. (2017). Three-Loop Monte Carlo Simulation Approach to Multi-State Physics Modeling for System Reliability Assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 276-289. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.06.003>

#### References [In Persian]

1. Salari, S., Karbasian, M., Nilipour, A., & Khayambashi, B. (1392). Analysis of the reliability of an offset system in the intelligent

- submarine power generation system using error tree method. *First National Symposium on Intelligent Marine Systems*. University of Science and Technology Submarine Complex. Shahin Shahr. <https://civilica.com/doc/236797>
- Ghanizadeh, M., & Poladi, J. (1395). Survey of wind turbine reliability function connected to the network-based block diagram method. *Second International Conference on New Research Findings in Science, Engineering and Technology*, Ministry of Science, Research and Technology, Isfahan University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Sciences. <https://civilica.com/doc/550435>
  - Mahdavi, Sh., & Miri Lavasani, M. R. (2013). Evaluation of Reliability of CNG Fuel Location by Block Diagram Method. *Health of Iran*, 3, 22-29. <https://ioh.iiums.ac.ir/article-1-1049-fa.html>
  - Hamdani Golshan, M. I., Haqi Pham, M. R., Shayanfar, H. A., & Hajian Hosseinabadi, H. (2012). Modeling and evaluating the reliability of post automation systems. Ministry of Science, Research and Technology, Isfahan University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering. [https://library.iut.ac.ir/dL /search/default.aspx?Term=8115&Field=0&DTC=107](https://library.iut.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=8115&Field=0&DTC=107)

استناد به این مقاله: شهرخی، محمود، فرهادی، محمد. (۱۴۰۳). بهبودسازی طراحی بویلرهای HRSG در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، مدیریت صنعتی، ۲۲(۷۲)، ۱-۳۵. DOI: 10.22054/jims.2024.75279.2873



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.