هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

مقدمه‌ای بر شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه‌های اتمی

محمدرضا عباسی [۱و۲]

۱- کارشناس مدیریت تحلیل عملکرد تجهیزات و سیستم‌ها، شرکت بهره‌برداری نیروگاه اتمی بوشهر، بوشهر، ایران، mrabbasi88@gmail.com
۲- استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، ایران

چکیده

بهره‌برداری ایمن از نیروگاه‌های اتمی با استفاده از قابلیت اطمینان بالای تجهیزات، استقرار یک سیستم کارای مدیریت ایمنی و حفظ صلاحیت موثر تجهیزات تضمین می‌گردد. با توجه به لزوم افزایش ایمنی در نیروگاه‌های اتمی، تعداد کانال‌های ایمنی آن‌ها و به‌تبع آن تعداد تجهیزات نیروگاهی افزایش می‌یابد. بنابراین در زمان بهره‌برداری، اطلاعات جزیی راجع به قابلیت اطمینان تک‌تک تجهیزات به صورت تصاعدی زیاد شده که این امر محاسبه دردسترس‌بودن نیروگاه و قابلیت اطمینان را نیازمند کدهای محاسباتی پیچیده نموده که در بیشتر نیروگاه‌ها درعمل انجام نمی‌شود. به همین منظور و با هدف اطلاع‌رسانی به مدیران ارشد نیروگاه و صنعت هسته‌ای در مورد وضعیت جاری قابلیت اطمینان نیروگاه از شاخص‌هایی کلی قابلیت اطمینان نیروگاه استفاده می‌شود. در این مقاله شاخص‌های قابلیت اطمینان که در یک نیروگاه اتمی در حال کار مورد استفاده قرار می‌گیرد، معرفی و بررسی می‌گردد. این شاخص‌ها به عنوان مبنایی جهت مقایسه کارایی نیروگاه‌های مختلف و انتقال تجارب مثبت بهره‌برداری محسوب شده و اطلاعات مفیدی را در اختیار ارزیابان جهت بررسی وضعیت ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه‌های اتمی قرار می‌دهد. در پایان علاوه بر شاخص‌ها نحوه‌کدبندی رنگی آن‌ها نیز جهت انتقال سریع وضعیت حوزه‌های تحت پایش ارایه می‌شود. از نتایج استقرار سیستم شاخص‌های قابلیت اطمینان در نیروگاه‌های اتمی می‌توان به عنوان الگویی جهت پایش قابلیت اطمینان نیروگاه‌های فسیلی یا صنایع دیگر استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: پایش قابلیت اطمینان، نیروگاه اتمی، شاخص‌های قابلیت اطمینان، تعمیرات پیش‌گیرانه

مقدمه

محاسبه قابلیت اطمینان تجهیزات و سیستم‌های نیروگاه‌ها و صنایع بزرگ از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این راستا مقالات متعددی جهت محاسبه و بررسی قابلیت اطمینان تالیف و تدوین شده است [۳-۱]. قابلیت اطمینان تجهیزات و سیستم‌ها در اثر مرور زمان، فرسودگی و شرایط محیطی می‌تواند تنزل یابد [۴] بنابراین پایش و مطالعه تغییرات قابلیت اطمینان تجهیزات با توجه به لزوم تثبیت سطح قابلیت اطمینان تجهیزات و حفظ حاشیه ایمنی[1] کار آن ها مهم ارزیابی می‌گردد.

ارزیابی مقدار قابلیت اطمینان در صنایع بزرگ و نیروگاه‌ها با توجه به تعدد تجهیزات مورد استفاده، نیازمند یک برنامه جامع یا کدهای محاسباتی است. اگرچه با استفاده از این کدها بر اساس مقدار قابلیت اطمینان هر تجهیز و با استفاده از چندگانگی مورد استفاده می‌توان قابلیت اطمینان کل را محاسبه کرد اما شبیه‌سازی و اجرای کدهای قابلیت اطمینان با تجهیزات زیاد و با تعداد دفعات زیاد معمولاً در نیروگاه‌های اتمی انجام نمی‌گردد.

به منظور حصول اطمینان از وضعیت قابل قبول قابلیت اطمینان نیروگاه از مجموعه شاخص‌هایی در جهت ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. استفاده از این شاخص‌ها ضمن ارزیابی وضعیت قابل اطمینان نیروگاه، زمینه را برای مقایسه وضعیت قابلیت اطمینان بین نیروگاه‌های دنیا فراهم می‌نماید. نیروگاه‌ها با مقایسه سطح قابلیت اطمینان خود با نیروگاه‌های دیگر، از تجارب مثبت نیروگاه‌هااستفاده کرده، معایب احتمالی را برطرف و حوزه‌های مرتبط بهبود می‌یابند. به همین منظور شاخص‌های قابلیت اطمینان بایستی توسط جامعه هسته‌ای پذیرفته شده باشند. به این منظور شاخص‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تا قبل از آن دارای تعریف مشخصی و معینی از طرف

[1] Safety margin

انجمن جهانی بهره‌برداران هسته‌ای[1] انستیتو بهره‌برداری انرژی هسته‌ای[2] انستیتو تحقیقات انرژی الکتریکی[3] داشته باشند.
شاخص‌هایی که در محاسبات قابلیت اطمینان منظور می‌شوند بایستی دارای خصوصیات زیر باشد [۵]:

- از شاخص‌ها و تعاریف استاندارد استفاده شده است؛
- شاخص مقادیر کمی از ایمنی هسته‌ای، قابلیت اطمینان نیروگاه و ایمنی کارکنان بدست می‌دهد؛
- قابل هدف‌گذاری می‌باشند؛
- بهبود آنها منجر به تصمیمات دشوار مدیریتی نمی‌گردد؛
- منعکس‌کننده فعالیت‌های حوزه‌هایی هستند که توسط مدیریت نیروگاه کنترل می‌شوند یا تاثیر می‌پذیرند؛
- داده‌ها قابل اعتمادند (غیر قابل دستکاری هستند)؛
- شاخص به صورت گسترده‌ای در نیروگاه‌های عضو WANO مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه به هر شاخص امتیازی داده شده تا قسمتی از امتیازات قابلیت اطمینان کل را از صفر تا صد تشکیل دهد. همچنین بر اساس مقادیر هر شاخص و بر اساس یک سیستم کدبندی رنگی، رنگ مربوط به وضعیت هر شاخص از بین رنگ‌های هشداردهنده سبز، زرد و قرمز انتخاب می‌شود. با استفاده از این سیستم رنگ‌بندی، مدیران ارشد نیروگاه حوزه‌های قابل بهبود را سریعاً شناسایی و اقدامات اصلاحی لازم را در جهت بهبود آن‌ها به‌کار گرفته یا پیگیری می‌نمایند.
برای معرفی کامل شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه و ارزیابی وضعیت قابلیت اطمینان بر اساس آن‌ها، در فصل اول به معرفی شاخص‌ها پرداخته می شود. فصل دوم اختصاص به نحوه امتیازبندی هر شاخص وکدبندی رنگ‌ها دارد. در انتها و در فصل سوم نکات مهم مرور شده و نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

فصل ۱: شاخص‌های قابلیت اطمینان

برای ارزیابی صحیح از وضعیت قابلیت اطمینان در نیروگاه‌های اتمی از شاخص‌های تاخیری[4] و شاخص‌های پیشرو[5] استفاده می‌کنیم [۶]. شاخص‌های تاخیری برای ارزیابی و تحلیل وضعیت قابلیت اطمینان در گذشته استفاده می‌شود درصورتیکه شاخص‌های پیشرو فعالیت‌هایی را که به بهبود وضعیت قابلیت اطمینان در آینده کمک می‌کند را بررسی و ارزیابی می‌نماید. در برنامه محاسبه قابلیت اطمینان نیروگاه هفت شاخص کلی استفاده می شود که از این میان چهار شاخص تاخیری و سه شاخص پیشرو هستند. در این فصل ابتدا چهار شاخص تاخیری و سپس سه شاخص پیشرو به همراه زیرشاخص‌های آن‌ها آورده می‌شود.

فاکتور کاهش انرژی اجباری: (Forced Loss Rate (FLR))

هدف از معرفی این شاخص تاخیری پایش میزان پیشرفت نیروگاه در کاهش مدت زمان قطعی از شبکه برق و کاهش قدرت در اثر خرابی تجهیزات، فاکتورهای انسانی یا شرائط دیگر در زمان بهره‌برداری (بدون در نظر گرفتن کاهش انرژی با برنامه و تمدیدآن) می باشد. این شاخص همچنین اثربخشی برنامه‌های نیروگاه و تجارب آن را جهت تولید انرژی مطمئن در زمانی که نیروگاه به شبکه برق سراسری متصل می باشد را منعکس کرده و معرف قابلیت اطمینان کلی تجهیزات و عملکرد کارکنان نیروگاه می‌باشد. این فاکتور از فرمول شماره (۱) محاسبه می گردد

$$FLR = \frac{FEL \times 100}{REG - (PEL + OEL)} \qquad (۱)$$

که در فرمول فوق FEL[6] کاهش انرژی صورت‌گرفته بدلیل خرابی تجهیزات یا عملکرد اشتباه کارکنان، REG[7] مقدار انرژی نامی، PEL[8] کاهش انرژی برنامه‌ریزی‌شده و OEL[9] کاهش انرژی بدلیل اطاله تعمیرات برنامه‌ریزی شده است که مقدار کاهش انرژی‌ها به صورت مگاوات ساعت محاسبه می گردد.معیار محسوب شدن یک کاهش قدرت به صورت برنامه‌ریزی شده اینست که آن کاهش قدرت چهار هفته جلوتر در برنامه کاری تعمیرات گنجانده شود. مقدار کم این شاخص نشان‌دهنده کم‌بودن ایراد تجهیزات موثر در تولید انرژی و خطای کارکنان است که به‌ترتیب معرف وضعیت قابلیت اطمینان تجهیزات و قابلیت اطمینان انسانی است.

تعداد خاموشی‌های برنامه‌ریزی نشده کلدر دوره ۷۰۰۰ ساعت

هدف از معرفی این شاخص تاخیری پایش مجموع خاموشی‌های اتوماتیک و دستی برنامه‌ریزی نشده راکتور در زمان بحرانی بودن آن است. این شاخص همچنین معرف بهبود ایمنی نیروگاه بوسیله کاهش خاموشی‌های ناخواسته و برنامه‌ریزی‌نشده و مبین کیفیت بهره‌برداری، نگهداری و قابلیت اطمینان نیروگاه می‌باشد. هرچه قابلیت اطمینان سیستم‌ها بیشتر باشد امکان خاموشی‌های ناخواسته راکتور کاهش می‌یابد. تعیین دوره ۷۰۰۰ ساعته یک پایه یکسان جهت مقایسه این

[1] World Association of Nuclear Operators (WANO)
[2] Institute of Nuclear Power Operations (INPO)
[3] Electric Power Research Institute (EPRI)
[4] Lagging Indicators
[5] Leading Indicators
[6] Forced Energy Loss
[7] Reference Energy Generation
[8] Planned Energy Loss
[9] Unplanned Outage Extension Energy Loss

شـاخص با نِیروگاه‌های دیگر را بدسـت می‌دهد. ۷۰۰۰ سـاعت تعداد سـاعات بحرانی در یک سـال اکثر نیروگاه‌ها محسـوب می گردد. این شاخص فرمول شماره (۲) محاسبه و گزارش می شود. مقدار صفر این شاخص در دوره‌های بلند مدت نشان‌دهنده و ضعیت منا سب عملکرد کارکنان و همچنین قابلیت اطمینان سیستم‌هایی است که خرابی آن‌ها می تواند منجر به عملکرد حفاظت اضطراری راکتور شود.

$$US7 = \frac{(\text{Number of Total Scrams}) \times 7000}{\text{Total Number of hours critical}} \qquad (۲)$$

تعداد موارد محدودیت‌های بهره‌برداری بدلیل الزامات ایمنی

مهمترین مدرک فنی که الزامات ایمنی یک نیروگاه را مشخص می‌کند نظامنامه فنی‌آذ ست. برای تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه، بر اســاس کدهای محاســباتی طراح نیروگاه فقط زمان محدودی برای خروج از کار بودن یک یا دو کانال از سیستم‌های ایمنی وجود دارد. در صورت افزایش مدت زمان خرابی تجهیزات کانال‌های ایمنی بیشتر از زمان مقرر در نظامنامه فنی بایســتی واکنش زنجیره‌ای در قلب راکتور متوقف شــود. بنابراین تعداد توقف‌ها بدلیل ایجاد محدودیت نظامنامه فنی به عنوان یک شــاخص تاخیری قابلیت اطمینان کل نیروگاه محسوب می شود. هر چه وضعیت سرویس فنی و نگهداری تجهیزاتی که تامین‌کننده ایمنی نیروگاه است مطلوب باشـد، مقدار این شـاخص کمتر و در حالت ایده‌ال صفر است.

عملکرد سیستم ایمنی

هدف از معرفی این شاخص پایش سه سیستم از سیستم‌های ایمنی است که نقش عمده ای در خنک سازی رآکتور در زمان وقوع حادثه را بر عهده دارند. این شـاخص یک برآورد سـاده را از در دسـترس نبودن[۲] تجهیزات این سـیسـتم‌ها بدسـت می‌دهد که همخوانی خوبی با روش‌های دقیق دیگر بر مبنای درخت خطا دارد. مقدار کم این شاخص بیانگر حاشیه ایمنی بیشتر برای بهره‌برداری سیستم‌های ایمنی نیروگاه و در نتیجه کمتر شدن احتمال آسیب دیدن راکتور است. این شاخص همچنین به صــورت غیر مســتقیم اثربخشــی تجارب بهره‌برداری و تعمیرات موثر را در میزان در دسـترس بودن سـیسـتم‌های مورد نظر منعکس می‌کند.

در محاسبه شاخص‌های عملکرد سیستم‌های ایمنی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در خنک‌کردن راکتور هنگام حادثه نقش دارند. ســه سیستم تزریق اسید بوریک فشار بالا (برای کاهش سریع راکتیویته)، سـیسـتم خنک‌کن اضـطراری مولدهای بخار و دیزل‌ژنراتورهای اضطراری به همراه زیرسیستم‌های آن‌هادر محاسبه شاخص ایمنی وارد می شود. این شاخص برای هر کدام از این سه سیستم یاد شده به صورت جداگانه و به صورت مجموع در دسترس نبودن تجهیزات این سـیسـتم‌ها (تجهیزاتی که عدم کارایی آنها باعث عمل نکردن کانال مربوطه می شود) در یک بازه زمانی (که وجود آن سیستم‌ها ضروری اسـت) تقسـیم بر تعداد کانال‌ها محاسـبه می شـود. هدف از این کار محاسبه مقدار متوسط در دسترس نبودن هر یک از کانال های ایمنی است.

$$SP = \frac{(\text{Plan. Unav. Hours} + \text{Unplan. Unav. Hours} + \text{Fault Exp. Unav. Hours})}{(\text{Hours sys. required}) \times (\text{number of trains})} \qquad (۳)$$

که در صـورت کسـر عدم در دسـترس بودن با برنامه[۳] عدم دسـترس بودن خارج از برنامه[۴] ساعات در دسترس نبودن پنهانی[۵] در نظر گرفته می‌شود. ساعات در دسترس‌نبودن پنهانی از اهمیت بالایی در محاسبه شـاخص سـیسـتم های ایمنی برخوردار اسـت بدلیل اینکه این مقدار منعکس‌کننده میزان زمانی است که سیستم یا تجهیز در حالت خرابی غیر مشـخص قرار دارد. برای تجهیزاتی که به صـورت دوره‌ای تسـت می شـود، این مدت زمان برابر با نصـف زمان کشـف عیب تا آخرین تست تجهیز یا سیستم است. تعداد ساعاتی که سیستم لازم است ضربدر تعداد مسیرها (کانال‌ها) در مخرج کسر منظور می شود. اهداف بلند مدت وانو برای سیستم‌هایتزریق اسید بوریک فشار بالا و سیستم خنـک‌کن اضــطراری مولـدهـای بخـار برابر بـا ۰/۰۲۰ و برای دیزل‌ژنراتورهای اضــطراری ۰/۰۲۵ اســت. مقدار کم این شــاخص نشان‌دهنده دردسترس بودن سیستم‌های ایمنی تحت پایش و قابلیت اطمینان بالای نیروگاهاست.

سرویس فنی و تعمیرات

ســرویس فنی و تعمیرات به‌موقع و باکیفیت تجهیزات نقش غیر قابل انکاری را در افزایش پایداری نیروگاه و قابلیت اطمینان آن ایفاء می‌کند. ســرویس فنی و تعمیرات پیش‌گیرانه باعث کاهش نرخ خرابی تجهیزات و افزایش قابلیت اطمینان آن می‌شـود. بنابراین برای ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه می‌توان وضــعیت ســرویس فنی و موثر بودن برنامه‌های تعمیراتی را به عنوان شاخصی پیشرو برای قابلیت اطمینان در نظر بگیریم [۷]. به این منظور سه زیرشاخص[۶] برای ارزیابی وضعیت سرویس فنی و تعمیرات در نظر گرفته می شود:

[1] Technical Specification
[2] Unavailability
[3] Planned Unavailable Hours
[4] Unplanned Unavailable Hours
[5] Fault Exposure Unavailable Hours
[6] Sub-indicator

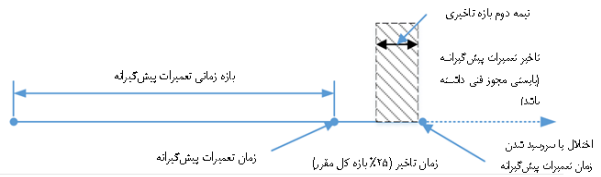
تعداد خرابی‌های رفع‌نشده بر روی اجزاء بحرانی نیروگاه هنگام کار نیروگاه در قدرت

اجزاء (المان‌هایی) که خرابی آن‌ها عواقبی غیرقابل قبول از نقطه نظر ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه در پی دا شته با شد، اجزاء یا المان‌های بحرانیمحسوب شده و خرابیاحتمالی آن‌ها باعث ازدست رفتن حا شیه ایمنی هســـته‌ای یا کاهش تولید انرژی الکتریکی می‌گردد. به عنوان مثال اجزایی که خرابی آن‌ها منجر به وضعیت‌های زیر می‌شود را اجزاء یا المان‌های بحرانی می‌گویند:

- توقف اضـــطراری راکتور یا خاموشـــی توربین که منجر به توقف راکتور گردد؛
- تغییرات قابل توجه قدرت–بیشتر از ۵٪ قدرت نامی راکتور؛
- خرابی اجزاء سیستم ایمنی؛

تعدد موارد رفع نشده خرابی‌ها معرف وضعیت نامناسب قابلیت اطمینان نیروگاه محســـوب شـــده بنابراین کاهش مقادیر این خرابی‌ها باعث افزایش قابلیت اطمینان نیروگاه می‌شود.

برای هر تجهیز مهم برای ایمنی یک دوره زمانی برای انجام سرویس فنی و تعمیر پیش‌گیرا نه درنظرگرفته می‌شـــود. جهت انعطاف و موثربودن برنامه‌ریزی معمولاً یک بازه زمانی تاخیری ممکن جهت انجام کار در نظر گرفته می‌شودکه عموماً ۲۵٪ بازه معمول انجام است. به طور مثال در حالتی که فعالیت معمول با دوره یک ماهه انجام می‌پذیرد، این بازه تاخیر یک هفته اســت. ماکزیمم زمان انجام یا "حد نهایی" معمولاً ۱۲۵٪ (۱۰۰٪ هنگام فعالیت تعمیراتی بدون تاخیر) دوره زمانی پیش‌بینی می‌شود. اکثر برنامه‌های سرویس فنی و تعمیرات پیش‌گیرانه امکان تاخیر زمان انجام را تا "حد نهایی" هنگام شـــرایط الزام آوری که بخش‌های مهندســـی توجیهات فنی را ارایه و با تغییرات موافقت کند، مجاز می‌دارند. در شـــکل شـــماره ۱ ارتباط بین دوره های زمانی تعمیرات پیش‌گیرانه و دوره‌های تاخیرات نشان‌داده شده است.



شکل شماره ۱: دوره های تعمیرات پیش‌گیرانه و زمان‌های تاخیر

بر اســـاس دوره‌های تعمیرات پیش‌گیرانه و بازه‌های تاخیری دو زیر شاخص زیر معرفی می شود:

۲-۵-۱ مجموع تعداد فعالیت‌های تعمیرات پیش‌گیرانه بحرانی انبا شته شده

فعالیت‌های تعمیرات پیش‌گیرانه‌ای که بر اســـاس مجوزهای فنی که توسط بخش‌های فنی تهیه و تایید شده‌اند و به بعد از گراف پیش‌بینی شده موکول شده‌اند (دوره تعمیرات + دوره تاخیر). تعداد زیاد تعمیرات انباشته‌شده در بازه زمانی برنامه مصوب می‌تواند به خرابی تجهیزات یا تعداد دوباره‌کاری‌ها منجر شود.

۳-۵-۱ تعداد فعالیت‌های بحرانی مهم که در نیمه دوم بازه تاخیری قرار دارد

مجموع تعداد تعمیرات پیش‌گیرانه بحرانی مهم که در نیمه دوم بازه تاخیری خود قرار دارند به عنوان یکی از زیر شـــاخص‌های قابلیت اطمینان مرتبط با ســـرویس فنی و تعمیرات در نظر گرفته می‌شـــود. برنامه ریزی منا سب جهت انجام سرویس فنی و تعمیرات پیش‌گیرانه می تواند باعث کاهش نرخ خرابی تجهیزات و افزایش قابلیت اطمینان نیروگاه شـــود. کاهش تعداد فعالیت‌های تعمیراتی در این بازه موجب کاهش فشار بر کارکنان تعمیرات شده که این امر باعث افزایش کیفیت سرویس فنی و تعمیرات می‌گردد.

برنامه‌ریزی تعمیرات

انجام دقیق فعالیت‌های تعمیراتی برنامه‌ریزی شـــده منجر به عدم انباشتگی آن‌ها و کاهش فشار کاری بر روی پرسنل تعمیرات می شود. این امر باعث افزایش کیفیت تعمیرات و کاهش دوباره‌کاری‌ها و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات می شود [۸]. به عنوان ارزیابی اثربخشی برنامه‌ریزی تعمیرات سه زیر شاخص زیر تعریف می‌شود:

۱-۶-۱ ثبات در احجام تعمیراتی بحرانی در طول هفته کاری

آماده به‌کار بودن اجزاء بحرانی نقش مهمی در ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه ایفاء می‌کنند بدلیل آنکه آنها مســـتقیماً به ایمنی هســـته‌ای و قابلیت اطمینان مرتبطند.بنابراین شـــاخص ثبات در احجام تعمیراتی بحرانی به صـــورت تعداد فعالیت‌های تعمیراتی بحرانی انجام شـــده به کل فعالیت های تعمیراتی برنامه‌ریزی شـــده تعریف می‌گردد. این شـــاخص توانایی قســـمت‌های مختلف نیروگاه (مدیریت فعالیت‌ها، سرویس فنی و تعمیرات، بهره‌برداری، پشتیبانی فنی–مهندسی و مانند آن) را در تهیه موثر و نتیجه‌بخش برنامه/گراف هفتگی مدیریت فعالیت‌های بحرانی در هنگام قدرت واحد منعکس می‌کند.

۲-۶-۱ اثربخشی برنامه‌ریزی تعمیرات برنامه‌ریزی شده

به منظور ارزیابی مدیریت فعالیت‌های تعمیراتی به هنگام توقف نیروگاه و تعمیرات برنامه‌ریزی شده، این شاخص تعریف شده و دقت و کارایی برنامه‌ریزی تعمیرات در هنگام توقف راکتور و تحقق آن را منعکس می‌کند. این شاخص به صورت درصد فعالیت‌های تعمیراتی انجام شده که در برنامه/گراف مدیریت فعالیت‌ها در توقف جهت تعویض ســـوخت از زمان شـــروع توقف (قطع کلیدهای خروجی ژنراتور) گنجانده شـــده

نسبت به کل فعالیت‌های تعمیراتتا انتهای توقف است (کلیدهای خروجی ژنراتور وصل شده‌اند).

۳-۶-۱ تعداد ماندگاری سیستم‌های نیروگاه با ریسک زرد و قرمز

به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های نیروگاه بایستی ریسک وقوع خرابی را در آن‌ها کاهش داد. ریسک هر سیستم به صورت حاصل‌ضرب احتمال خرابی در شدت وقوع خرابی در فاکتور کشف محاسبه شده و برای هر سیستم Heat map (شامل نواحی قرمز، زرد و سبز بر اساس عدد ریسک) ترسیم می‌شود. برنامه‌ریزی فعالیت‌های تعمیراتی بایستی به‌گونه‌ای باشد که پس از هر تعمیرات سالانه همراه با عملیات تعویض سوخت، ریسک تمامی سیستم‌های نیروگاه کاهش یافته و در ناحیه سبز قرار گیرند. اما بنا به دلایل فنی، کمبود زمان یا منابع بعد از هر تعمیر سالانه هنوز تعدادی از سیستم‌ها با ریسک بالا و در نواحی زرد یا قرمز باقی می‌مانند. بنابراین تعداد سیستم‌هایی که وضعیت ریسک آنها در بازه بیشتر از یک سیکل سوخت‌گذاری به صورت "قرمز" یا زرد" قرار دارند معرف انباشتگی فعالیت‌های تعمیرات، افزایش احتمال وقوع حوادث و کاهش قابلیت اطمینان نیروگاه محسوب شده و به عنوان یکی از شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه مطرح می‌گردد.

شاخص شیمیایی آب

رژیم شیمیایی آب عاملی حیاتی برای بهره‌برداری از نیروگاه‌های اتمی محسوب می شود. تنزل رژیم شیمیایی باعث خوردگی و فرسودگی اجزاء نیروگاه و در نتیجه افزایش نرخ خرابی تجهیزات و پمپ‌ها و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان می‌گردد. برای ارزیابی وضعیت رژیم شیمیایی آب،شاخص شیمیایی جهت پایش موادی که از نظر فرسایشی در سیستم‌های نیروگاه مهم می‌باشند، معرفی می‌گردد.این شاخص بر اساس غلظت محصولاتی که از نظر تولیدات ناخالصی و فرسایشی در مولد بخار مهم هستند، استوار است. در راکتورهای تحت فشار تمرکز اصلی بر روی رژیم شیمیایی آب مدار دوم قرار دارد.بنابراین غلظت کلرید، سولفات و سدیم و رسانش الکتریکی بدست آمده از زیرکش مولد بخار، آهن و مس موجود در آب تغذیه به عنوان مقادیر مورد نیاز برای محاسبه شاخص شیمیایی استفاده می‌شود:

$$CPI = \frac{\sum_{i=Con,Cl,SO_4,Na,Fe,Cu} \max(1, i / LV_X)}{6} \qquad (۴)$$

که در فرمول فوق LVx مقادیر استاندارد یا هدف تعیین شده برای محصول شیمیایی i است. بر اساس فرمول شماره (۴)، اگر مقدار شاخص برابر یک شد تمامی استانداردها یا اهداف برآورده شده است در غیر این صورت حداقل یکی از پارامترهای تحت کنترل بالاتر از مقدار مجاز قرار دارند.

فصل ۲: سیستم امتیازدهی و کدبندی رنگی شاخص‌ها

برای ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه نمره‌ای بین صفر تا صد به وضعیت قابلیت تعلق می‌گیرد که هر شاخص قسمتی از نمره کل را نمایندگی می‌کند. مقدار امتیاز هر شاخص بستگی به اهمیت شاخص، تجارب بین‌المللی و رویدادهای مرتبط با هر شاخص دارد.

جدول شماره ۱: امتیازبندی شاخص‌های قابلیت اطمینان

شاخص‌های قابلیت اطمینان	امتیاز
فاکتور کاهش انرژی اجباری	۷
تعداد خاموشی‌های کل برنامه‌ریزی نشده	۱۰
تعداد موارد محدودیت‌های بهره‌برداری بدلیل الزامات ایمنی	۸
عملکرد سیستم‌های ایمنی	۸
تعداد خرابی‌های رفع‌نشده بر روی اجزاء بحرانی نیروگاه هنگام کار نیروگاه در قدرت	۸
مجموع تعداد فعالیت‌های تعمیرات پیش‌گیرانه بحرانی انباشته شده	۸
تعداد فعالیت‌های بحرانی مهم در نیمه دوم بازه تاخیری	۱۰
ثبات در احجام تعمیراتی بحرانی در طول هفته کاری	۱۰
اثریخشی برنامه‌ریزی تعمیرات برنامه‌ریزی شده	۱۲
تعداد خرابی‌های سیستم‌های نیروگاه	۱۲
شاخص شیمیایی آب	۷
امتیاز کل	۱۰۰

علاوه بر امتیازبندی کلی، امتیازی که به هر شاخص تعلق می‌گیرد نیز بایستی بسته به مقدار آن درجه‌بندی شده و در هر ناحیه یک کدرنگی اختصاص می‌یابد تا تعیین‌کننده وضعیت جاری شاخص باشد. برای شاخص‌های قابلیت اطمینان و زیرشاخص‌های آن‌ها این تقسیم بندی در جداول ۲ تا ۱۲ آورده می شود.

جدول شماره ۲: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص کاهش انرژی اجباری

امتیاز	وضعیت	بازه
۷	سبز	$0 \le x < 1$
۶	زرد	$1 \le x < 2$
۵	زرد	$2 \le x < 3$
۴	زرد	$3 \le x < 4$
۳	زرد	$4 \le x < 5$
۲	قرمز	$5 \le x < 6$
۱	قرمز	$6 \le x < 7$
۰	قرمز	$7 \le x$

جدول شماره ۳: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص تعداد خاموشی‌های برنامه‌ریزی نشده در دوره ۷۰۰۰ ساعت

امتیاز	وضعیت	بازه
۱۰	سبز	$0 \leq x < 0.8$
۸	زرد	$0.8 \leq x < 1.2$
۶	زرد	$1.2 \leq x < 1.5$
۵	زرد	$1.5 \leq x < 1.8$
۴	زرد	$1.8 \leq x < 2.1$
۳	قرمز	$2.1 \leq x < 2.4$
۲	قرمز	$2.4 \leq x < 2.7$
۱	قرمز	$2.7 \leq x < 3.1$
۰	قرمز	$3.1 \leq x$

جدول شماره ۴: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص تعداد موارد محدودیت‌های بهره‌برداری بدلیل الزامات ایمنی

امتیاز	وضعیت	بازه
۱۰	سبز	$0 \leq x < 8$
۸	زرد	$8 \leq x < 12$
۶	زرد	$12 \leq x < 14$
۵	زرد	$14 \leq x < 16$
۰	قرمز	$16 \leq x$

جدول شماره ۵: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص عملکرد سیستم ایمنی

امتیاز	وضعیت	معیار
۸	سبز	تمامی سیستم‌های ایمنی اهداف بلندمدت وانو را برآورده کرده است.
۵	زرد	یک سیستم ایمنی اهداف بلندمدت وانو را برآورده نکرده است.
۲	زرد	دو سیستم ایمنی اهداف بلندمدت وانو را برآورده نکرده است.
۰	قرمز	تمام سیستم‌های ایمنی اهداف بلندمدت وانو را برآورده نکرده‌اند.

جدول شماره ۶: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص خرابی‌های رفع‌نشده بر روی اجزاء بحرانی نیروگاه هنگام کار نیروگاه در قدرت

امتیاز	وضعیت	بازه
۸	سبز	$0 \leq x < 30$
۶	زرد	$30 \leq x < 60$
۴	زرد	$60 \leq x < 90$
۲	زرد	$90 \leq x < 120$
۱	قرمز	$120 \leq x < 150$
۰	قرمز	$150 \leq x$

جدول شماره ۷: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص تعداد فعالیت‌های تعمیرات پیش‌گیرانه بحرانی انباشته شده

امتیاز	وضعیت	بازه
۸	سبز	$0 \leq x < 4$
۶	سبز	$4 \leq x < 6$
۴	زرد	$6 \leq x < 10$
۳	زرد	$10 \leq x < 14$
۲	قرمز	$14 \leq x < 18$
۱	قرمز	$18 \leq x < 24$
۰	قرمز	$24 \leq x$

جدول شماره ۸: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص تعداد فعالیت‌های بحرانی مهم که در نیمه دوم بازه تاخیری قرار دارد

امتیاز	وضعیت	بازه
۱۰	سبز	$0 \leq x < 20$
۶	زرد	$20 \leq x < 25$
۴	زرد	$25 \leq x < 30$
۲	قرمز	$30 \leq x < 35$
۰	قرمز	$24 \leq x$

جدول شماره ۹: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص ثبات در احجام تعمیراتی بحرانی در طول هفته کاری

امتیاز	وضعیت	بازه
۸	سبز	$90\% \leq x$
۶	سبز	$88\% \leq x < 90\%$
۴	زرد	$86\% \leq x < 88\%$
۳	زرد	$83\% \leq x < 86\%$
۲	قرمز	$80\% \leq x < 83\%$
۱	قرمز	$70\% \leq x < 80\%$
۰	قرمز	$x < 70\%$

جدول شماره ۱۰: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص اثربخشی برنامه‌ریزی تعمیرات برنامه‌ریزی شده

امتیاز	وضعیت	بازه
۱۲	سبز	$93\% \leq x$
۱۰	سبز	$85\% \leq x < 93\%$
۸	زرد	$78\% \leq x < 85\%$
۶	زرد	$70\% \leq x < 78\%$
۴	قرمز	$65\% \leq x < 70\%$

۲	قرمز	$60\% \leq x < 65\%$
۱	قرمز	$55\% \leq x < 60\%$
۰	قرمز	$x < 55\%$

جدول شماره ۱۱: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص ماندگاری سیستم‌های نیروگاه با ریسک زرد و قرمز

امتیاز	وضعیت	بازه
۱۲	سبز	$x = 0$
۱۰	سبز	$x = 1$
۸	زرد	$x = 2$
۶	زرد	$x = 3$
۴	قرمز	$x = 4$
۳	قرمز	$x = 5$
۲	قرمز	$x = 6$
۱	قرمز	$x = 7$
۰	قرمز	$x \geq 8$

جدول شماره ۱۲: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص شیمیایی آب با استفاده از کدبندی رنگی

امتیاز	وضعیت	بازه
۷	سبز	$x = 1.00$
۴	زرد	$1.00 \leq x < 1.05$
۰	قرمز	$1.05 \leq x$

می‌توان حوزه‌های قابل بهبود را شناسایی و اقدامات اصلاحی را در جهت رفع آن‌ها براساس تجارب داخلی یا خارجی و همچنین تمرکز منابع مالی و انسانی انجام داد. علاوه بر آن‌ها بر اساس امتیاز کل دریافتی از جدول شماره ۱، یک کد رنگی به قابلیت اطمینان کل نیروگاه نیز تعلق می‌گیرد که بر اساس جدول شماره ۱۳ تعیین می شود.

جدول شماره ۱۳: امتیازات و کدبندی رنگی شاخص قابلیت اطمینان کل

وضعیت	بازه
سبز	$89 \leq x < 100$
زرد	$60 \leq x < 89$
قرمز	$0 \leq x < 60$

فصل ۳: نتیجه‌گیری

استفاده از روش ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان می‌تواند ارزیابی سریع و مطمئنی را از وضعیت تجهیزات و فعالیت‌های مرتبط با قابلیت اطمینان نیروگاه ارایه دهد. در این روش نیازی به اجرای برنامه‌های کامپیوتری پرهزینه و زمان‌بر برای محاسبه قابلیت اطمینان کل با استفاده از قابلیت اطمینان اجزاء و تجهیزات نیروگاه نیست و امتیاز صفر تا صد از طریق تجمیع شاخص‌های تاخیری و پیشرو قابل اندازه‌گیری، به شاخص قابلیت اطمینان نیروگاه داده می‌شود. با نگاه اجمالی به شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه و با استفاده از کدهای رنگی نواقص حوزه‌های مختلف شناسایی شده و اقدامات اصلاحی متناسب تدوین و اجراء می شود. علاوه بر این مزایا، استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان زمینه مقایسه نیروگاه را با نیروگاه‌های اتمی در سراسر دنیا فراهم کرده و امکان تبادل تجارب بهره‌برداری در خصوص بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان را فراهم می‌نماید.

مراجع

[1] M.R. Mamdikar, V. Kumar, P. Singh, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 54, pp. 1213-1220, 2022.
[2] Y.Cui, C. Zhang, L. Zhang,K. Song, Annals of Nuclear energy, Vol. 172, pp.109073, 2022.
[3] A. M. Tripathi, B. L. K. Singh, C. S. Singh, Annals of Nuclear energy, Vol. 140, pp.107139, 2020.
[4] D. Mario Francesco, F. Matteo, G. carlo, P. Federico, Z. Enrico, Reliability Engineering& SystemSafety, Vol. 205, pp.107173, 2021.
[5] R. Chiarelli, WANO Performance Indicator Programme Reference Manual, 2014.
[6] A. Hopkins, Safety Science,Vol. 47,460–465, 2009.
[7] SMRP Best Practices, 5th ed., 2009.
[8] K. Thomson, WANO Guideline 2018-02, Equipment Reliability, 2018.