J. of Nucl Sci. and Tech.
85, 2018, 113-118

مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای
۸۵، ۱۳۹۷، ۱۱۳-۱۱۸

Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

ارزیابی سیستم پاشش آب در پوشش ایمنی رآکتور VVER-1000 با استفاده از روش‌های احتمالاتی

داریوش مستی*، علی خسروآبادی، علی رحمانی حقیقی

شرکت بهره‌برداری نیروگاه اتمی بوشهر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۱-۷۵۱۸۱، بوشهر ـ ایران

چکیده: یکی از سیستم‌های مهم از نظر ایمنی، سیستم پاشش آب در پوشش ایمنی رآکتور است که در زمان حادثه برای محدود نمودن خروج مواد پرتوزا به ویژه ید از درون پوشش ایمنی رآکتور به بیرون و نیز کاهش فشار و دمای درون کره‌ی فلزی طراحی شده است. عملکرد این سیستم توسط طراح نیروگاه با روش‌های احتمالاتی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار ریسک اسپکتروم ارزیابی شده است. در این مقاله با کمک تحلیل احتمالاتی و با استفاده از نرم‌افزار سفیر، احتمال خطای سیستم در حالت‌های مختلف محاسبه شده است. از آن‌جا که برخی تجهیزها در مدل‌سازی انجام شده توسط پیمانکار مدل نشده‌اند، اهمیت عناصر سیستم پاشش آب محفظه‌ی فلزی رآکتور تحلیل شد و اهمیت تجهیزهای ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها: ***سیستم پاشش آب، پوشش ایمنی رآکتور، تحلیل ایمنی احتمالاتی (PSA)، درخت خطا***

Spray System Assessment in Steel Containment of VVER-1000 Reactor with Using Probabilistic Methods

D. Masti*[1], A. Khosroabadi, A. Rahmani Haghighi

Busher Nuclear Power Plant Operation Co, AEOI, P.O.Box: 75181-111, Busher-Iran

Abstract: One of the most important safety systems is spray system which is located in steel containment and has been designed to limit radioactive materials release, specially iodine, and to reduce the pressure and temperature in steel containment during events. The functions of mentioned system have been evaluated by the NPP designer by using probabilistic methods and the Risk Spectrum code. Some of the equipment, however, have not been simulated in the implemented modeling. In this article, by using the probabilistic analysis and the SAPHIRE code, the importance of the spray system's elements in steel containment has been analyzed and the probability of system failures in various conditions has been calculated.

Keywords: ***Water Spray System, Safety Steel Containment, Probabilistic Safety Analysis (PSA), Fault Tree***

*Email: masti@nppd.co.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۹/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۵/۲۸

Archive of SID
www.SID.ir

۱. مقدمه

تحلیل ایمنی به روش احتمالاتی[۱] از ابتدای دهه‌ی ۶۳ میلادی مطرح و در اواسط دهه‌ی ۷۳ به صورت مفهومی پایه‌گذاری شد. از زمان حادثه‌ی تری مایل آیلند[۲] در سال ۱۹۷۹، سطح ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای از راه انجام تجزیه و تحلیل حادثه‌های وخیم به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. پس از این حادثه، بر تحلیل ایمنی به روش احتمالاتی به عنوان یک روش تحلیل ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای تأکید بیش‌تری شده و از آن تاریخ تاکنون، به یک ابزار جامع برای ارزیابی‌های ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای در بسیاری از کشورها بدل شده است. در سال‌های اخیر، طراحی انجام شده برای تمامی نیروگاه‌های هسته‌ای، باید بتواند برخی معیارهای تحلیل ایمنی به روش احتمالاتی را مطابق الزام‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی کسب نماید به طوری که نتیجه‌های حاصل از این ارزیابی‌ها مانند فراوانی آسیب قلب، به عنوان یکی از نیازمندی‌های ضروری برای اخذ مجوز ساخت و یا بهره‌برداری در نظر گرفته شده است.

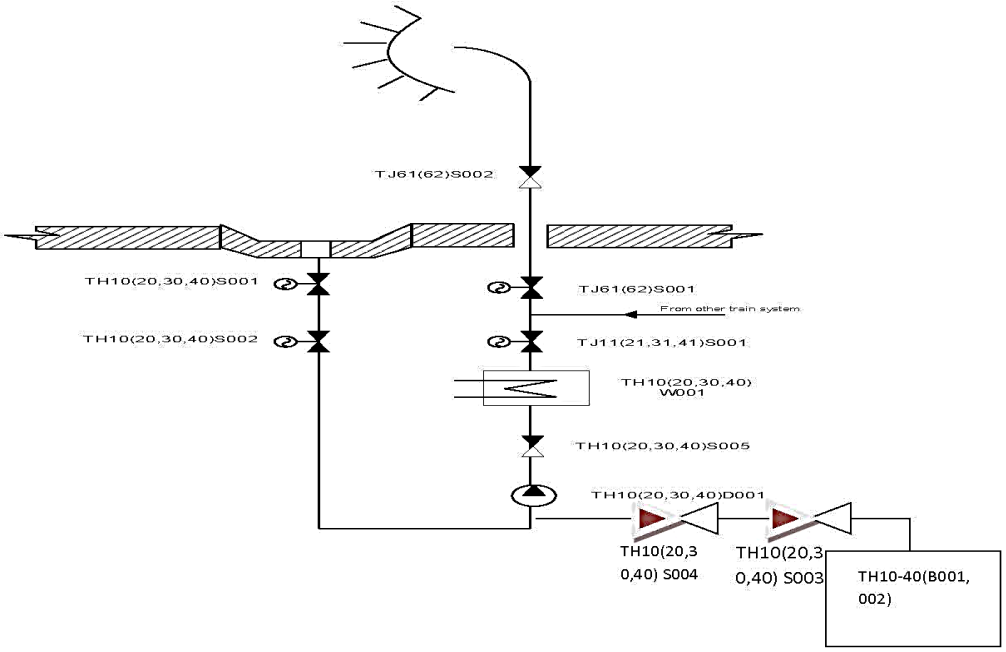
در سال‌های قبل برای انجام مقایسه بین دو نرم‌افزار سفیر[۳] و ریسک اسپکتروم[۴]، حادثه‌ی قطع کامل برق [۱]، حادثه‌ی شکست کوچک لوله‌های مولد بخار [۲] با نرم‌افزار سفیر مدل‌سازی شده که در پژوهش حاضر به آن‌ها توجه شده و مورد نظر بوده‌اند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که نیروگاه‌های اتمی با آن روبه‌رو هستند، عدم تجربه‌ی کافی در مورد حادثه‌هایی است که در یک نیروگاه اتمی می‌تواند رخ دهند. علت این امر آن است که تعداد حادثه‌های جدی به وقوع پیوسته در دنیا اندک‌اند. در نتیجه با استفاده از شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل سیستم‌های ایمنی نیروگاه‌های اتمی می‌توان مقدار احتمال خطر، اهمیت تجهیزها، نقاط ضعف و شدت حادثه‌ها را تعیین و امکان مدیریت حادثه‌ها، جلوگیری از اثرهای جبران‌ناپذیر، اتخاذ تدبیرها و رویکردهای پیشگیرانه را فراهم نمود.

تولید و انباشت مواد پرتوزا در مدت بهره‌برداری از نیروگاه‌های اتمی و احتمال خروج، انتشار و اثرهای زیان بار آن‌ها بر کارکنان، مردم و محیط اطراف باعث شده است تا ایمنی نیروگاه‌های اتمی یک مسأله‌ی حیاتی به شمار آید. سیستم پاشش آب (TJ) در پوشش ایمنی رآکتور از چهار کانال تشکیل شده که هر دو کانال ۴۰، TJ۱۰ و ۳۰، TJ۲۰ دارای یک لوله‌ی مشترک برای تزریق پتاسیم بورات به جمع‌کننده‌ی مشترک پاشش آب و نازل‌های پاشش آب در قسمت بالایی کره فلزی است. شکل ۱ سیستم مورد نظر و اجزای آن را نمایش می‌دهد. در هر کانال محلول با نرخ جریان ۳۰۰ تن در ساعت از طریق لوله‌های به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و توسط پمپ‌های خنک‌سازی اضطراری و برنامه‌ریزی شده D۰۰۱ (۲۰, ۳۰, ۴۰) TH۱۰ به نازل‌ها فرستاده می‌شود. نرخ جریان ۳۰۰ تن در ساعت توسط لوله‌ی محدودکننده‌ی نرخ جریان تنظیم و خنک‌سازی محلول توسط مبدل حرارتی سیستم B۰۰۳ (۲۰, ۳۰, ۴۰) TH۱۰ انجام می‌شود. در شرایط بهره‌برداری عادی و اختلال در شرایط بهره‌برداری عادی، سیستم در حالت آماده به کار قرار دارد و شیرهای S۰۰۱ (۶۲) TJ۶۱ باز هستند. سیستم در شرایط حادثه وظیفه‌ی کاهش فشار و دمای درون کره در اثر شکست در لوله‌های مدار اول یا مدار دوم و ترکیب و زدودن پاره‌های شکافت (به خصوص ید پرتوزا) درون فضای کره‌ی فلزی با هدف جلوگیری از نشت آن‌ها به فضای بیرونی را بر عهده دارد. هنگام حادثه‌های مربوط به نشت مدار اول یا مدار دوم، پمپ‌های D۰۰۱ (۲۰, ۳۰, ۴۰) TH۱۰ به صورت خودکار با ارسال علامت کاهش اختلاف دمای اشباع مدار اول و دمای یکی از شاخه‌های گرم متصل به رآکتور به کم‌تر از ۱۰ درجه‌ی سلسیوس و یا افزایش فشار اضافی درون کره‌ی فلزی به مقدار MPa ۰٫۰۲۹ وارد کار می‌شود. پس از روشن شدن پمپ‌ها، آب در مسیر چرخش داخلی شروع به گردش کرده و زمانی که فشار درون کره‌ی فلزی به MPa ۰٫۰۳ افزایش یافت، شیرهای S۰۰۱ (۲۱, ۳۱, ۴۱) TJ۱۱ باز و آب به نازل‌ها فرستاده می‌شود. البته دست یافتن به نرخ جریان ۳۰۰ تن در ساعت بلافاصله پس از باز شدن نازل‌ها امکان‌پذیر نیست و نیازمند زمانی برابر ۲۰ تا ۳۰ دقیقه است. پاشش آب از نازل‌ها به درون کره‌ی فلزی تا زمانی که فشار درون کره به MPa ۰٫۰۰۲ کاهش نیابد، ادامه خواهد یافت. در این موقع شیرهای S۰۰۱ (۲۱, ۳۱, ۴۱) TJ۱۱ و S۰۰۱ (۶۲) TJ۶۱ بسته شده و سیستم پاشش آب از مدار خارج می‌شود [۳]. تانک‌های (B۰۰۱, ۰۰۲) ۴۰, ۳۰, ۲۰، TH۱۰ با حجم ۱۹۷٫۵ مترمکعب برای هر کانال، آب مورد نیاز سیستم پاشش را تأمین می‌نمایند. در مدل‌سازی طراح نیروگاه، نقش این تانک‌ها و شیرهای مربوطه S۰۰۴ (۴۰, ۳۰, ۲۰) TH۱۰ و S۰۰۳ (۴۰, ۳۰, ۲۰) TH۱۰ لحاظ نشده بودند که در این پژوهش این تجهیزها در نظر گرفته شدند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. نمودار سیستم پاشش آب داخل پوشش ایمنی رآکتور و اجزای آن.

۲. روش کار

برای مدل کردن سیستم پاشش آب در پوشش ایمنی رآکتور مرحله‌های زیر صورت گرفته است:

۱.۲ تحلیل سیستم

- مشخصه‌های کلی سیستم که دربرگیرنده‌ی عنصرها و تجهیزهای سیستم، وظیفه و عملکرد سیستم در شرایط طبیعی بهره‌برداری و یا حادثه، مرزهای سیستم و مشخصه‌های فنی عنصرها و تجهیزها مانند طریقه‌های خطا است،
- مشخصه‌های سیستم کنترلی و برقی شامل علامت‌های فعال‌کننده و شرایط عملکرد آن‌ها،
- سیستم‌های پشتیبان شامل سیستم‌های تهویه، ابزار دقیق و برق.
- مشخصه‌های تعمیر و نگه‌داری تجهیزهای سیستم،
- تعیین کلیه‌ی تجهیزهایی که باید مدل‌سازی شوند.

۲.۲ حالت‌های خرابی تجهیزها

در تحلیل خرابی سیستم پاشش آب تمام حالت‌های خرابی تجهیزها دیده شده است. حالت خرابی تجهیزها براساس نوع کارکرد تجهیز تعیین می‌شود. تجهیزها و مخزن‌ها براساس حالت‌های خرابی به صورت برقی، مکانیکی در دو حالت خرابی قطعی (به طور مثال برای پمپ خطا در روشن شدن) و تنزل یافته (به طور مثال برای یک پمپ لرزش و صدا) دسته‌بندی شده‌اند.

۳.۲ نرخ خرابی تجهیزها

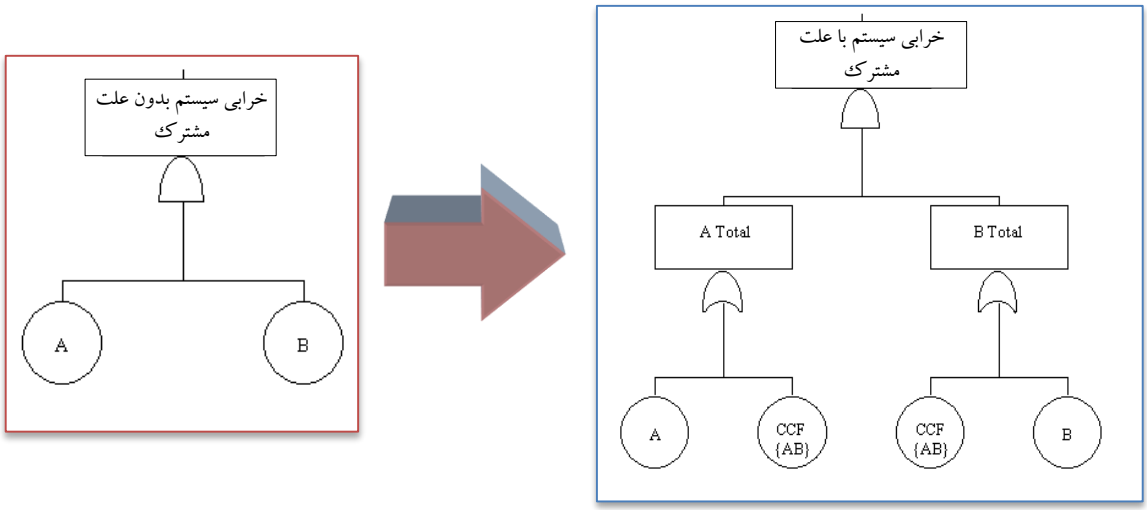
برای تعیین نرخ خرابی تجهیزها از داده‌ها و منبع‌های عمومی نیروگاه‌ها [۴] استفاده می‌شود که شامل حالت‌های خرابی تجهیزها، طول دوره‌ی آزمون، طول دوره‌ی تعمیرها و مدت کارکرد تجهیزها و غیره است. از این اطلاعات در محاسبه‌ی مدل‌های گوناگون قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

۴.۲ تحلیل خرابی با علت مشترک

تحلیل خرابی با علت مشترک[۵]، بیان‌گر در دسترس نبودن دو یا چند تجهیز به دلیل خرابی مشترک است. رویدادهای آغازگر با علت‌های مشترک در اثر حادثه‌های خارجی و یا طبیعی ایجاد می‌شوند. برای تحلیل خرابی با علت‌های مشترک در ابتدا باید گروه‌بندی قطعه‌ها و تجهیزها از لحاظ یکسان بودن نوع آن‌ها (مثل پمپ، شیر و غیره)، شرایط و خصوصیت‌های کارکرد آن‌ها (در حال کار یا رزرو بودن آن‌ها)، عملکرد و طرز خرابی آن‌ها (مثلاً خطا در باز شدن و یا کار نکردن و ...) صورت پذیرد. در مرحله‌ی بعد باید درخت خطا برای آن‌ها ترسیم شود. برای مدل‌سازی خرابی‌های با علت مشترک از مدل ضریب آلفا[۶] استفاده شده است. در شکل ۲ چگونگی وارد کردن خطای حالت مشترک در درخت‌های خطا نمایش داده شده است. پارامترهای مدل ضریب آلفا این است

$$\alpha^{(m)}_k = \frac{\binom{m}{k}\alpha^{(m)}_k}{\sum_{k=1}^{m}\binom{m}{k}\alpha^{(m)}_k} \qquad (۱)$$

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. چگونگی مدل‌سازی خطای حالت مشترک در درخت خطا.

که در آن، $\binom{m}{k}\alpha^{(m)}_k$ احتمال واقعه‌هایی است که در آن k تجهیز در گروهی با m تجهیز دچار نقص شده باشد، و $\alpha^{(m)}_k$ نسبت احتمال نقص‌های اتفاق افتاده‌ی k تجهیز به احتمال تمام نقص‌های اتفاق افتاده در گروهی با m تجهیز است.

۵.۲ تحلیل خطای انسانی

خطای انسانی عبارت است از هر عمل انسانی که از برخی از محدوده‌های قابل قبول تجاوز کند. سیاهه‌ی خطای انسانی مورد استفاده در تحلیل به سه دسته تقسیم می‌شود: نوع A (پیش‌آغازگرها[۷]): خطاهای انسانی قبل از رویداد و یا قبل از استفاده از تجهیز (نظیرخطای حین درجه‌بندی، اشتباه در حین آزمون) هستند. نوع B (آغازگرها): خطاهای انسانی که منجر به رویدادهای اولیه می‌شوند. نوع C (پس‌آغازگرها): خطاهای انسانی که پس از رویداد (خطا در اجرای اقدام‌های لازم در پاسخ به رویداد اولیه، خطا در تشخیص یا در اجرا) ایجاد می‌شوند. در مدل‌سازی سیستم از داده‌ها و منبع‌های عمومی، خطای نوع A و C استخراج شده‌اند.

۶.۲ انجام تحلیل‌های اهمیت

تحلیل و تجزیه‌ی اهمیت برای شناسایی عناصر کلیدی و مؤثر در ایجاد خطا، حادثه‌ها، کاهش هزینه‌های آزمون و تعمیرها، کاهش مدت زمان آزمون‌های دوره‌ای، برگرداندن سریع تجهیزهای خارج از سرویس و بهبود عملکرد تجهیزها انجام می‌شود. در این پژوهش تحلیل اهمیت برای شناسایی مهم‌ترین رویدادهای پایه با استفاده از روش فوسل- وسلی[۸] و ریسک اینکریز[۹] و ریسک دیکریز[۱۰] انجام شد و نتیجه‌های تحلیل اهمیت برای ۱۶ اولویت اول در جدول ۱ درج شده است. در این جدول لیست تجهیزها از نظر اهمیت با توجه به معیار فوسل- وسلی ارایه شده است. این روش با هدف محاسبه‌ی اهمیت رویداد I انجام می‌شود و به صورت سهم نسبی رویداد در فراوانی آسیب قلب یا فراوانی توالی حوادث تعریف می‌شود. معیار F-V چنین بیان می‌شود:

$$I^{FV}_{\ i} = \frac{Q_{TOP}(MCS\ \ including\ i)}{Q_{TOP}} \qquad (۲)$$

که در آن Q_{TOP} میزان عدم دسترسی در یک مجموعه‌ی مینیمال کات‌ست است.

۳. یافته‌ها و بحث

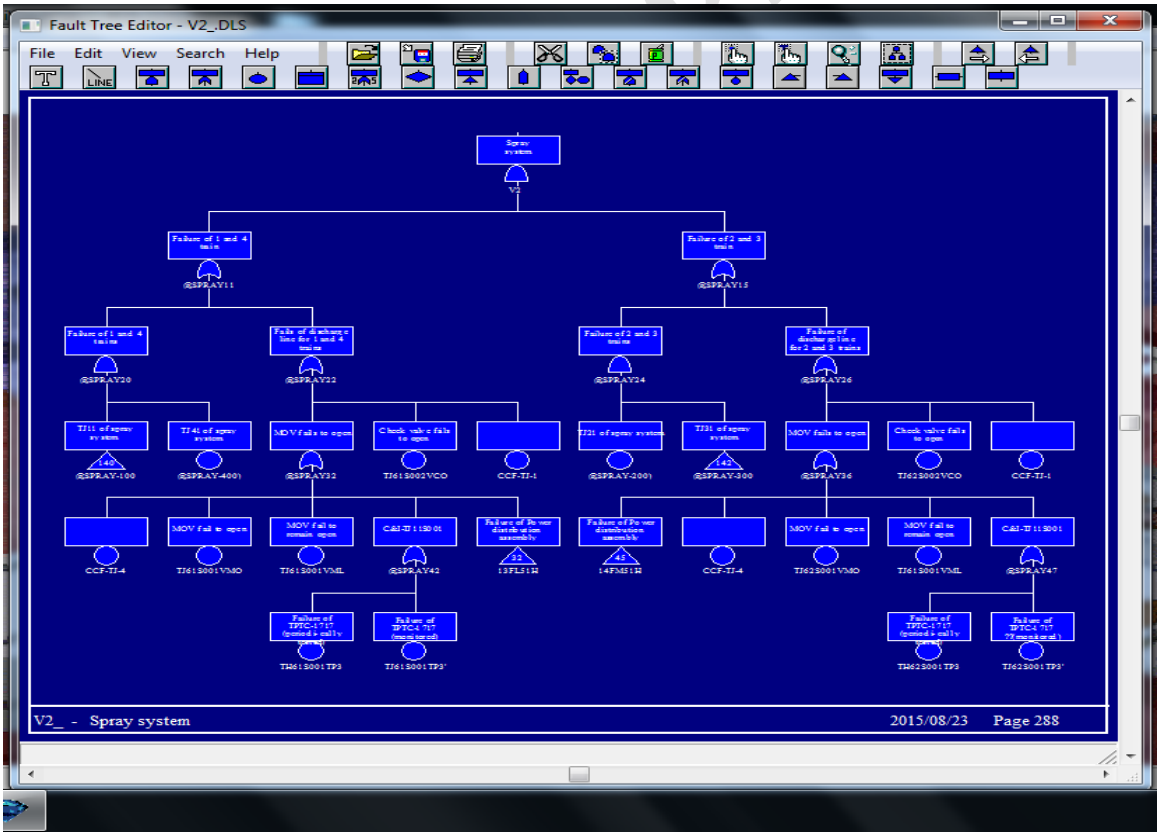
برای تکمیل مدل‌سازی سیستم پاشش آب، در مجموع ۳۰۰ درخت خطا ترسیم شد که درخت خطای اصلی تولید شده توسط نرم‌افزار سفیر [۵] در شکل ۳ نمایش داده شده است. هر کدام از عناصر پایه‌ی این درخت می‌تواند خروجی درخت‌های خطای دیگری باشد. نتیجه‌ها و یافته‌های حاصل از تحلیل‌های انجام شده به شرح زیر هستند:

- مقدار احتمال کلی خرابی سیستم پاشش آب برابر با $۱٫۸۷۵\times۱۰^{-۲}$ محاسبه شد؛

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. نتیجه‌های تحلیل اهمیت (به ترتیب اولویت) برای سیستم پاشش آب پوشش ایمنی رآکتور

N	کد رویداد اولیه	شرح
ردیف	DGR	خطا در حین کار سیستم برق اضطراری مولد دیزلی
۲	MAINT-VE	تعمیرهای سیستم VE
۳	MAINT-VJ	تعمیرهای سیستم VJ
۴	MAINT-UF	تعمیرهای سیستم UF
۵	MAINT-PS	تعمیرهای سیستم برق اضطراری
۶	۱۱BU÷۱۴BW-BASICB	خطا در سیستم کلید زنی برق اضطراری
۷	۱۱-۱۴EA	خطا در سیستم باتری
۸	CCF-DGR	خطای حالت مشترک برای سیستم برق اضطراری مولد دیزلی
۹	VE۲۱-۴۱ D۰۰۱PMS	خطای در استارت پمپ‌های سیستم VE
۱۰	VJ۲۱-۴۱ D۰۰۱PMS	خطای در استارت پمپ‌های سیستم VJ
۱۱	UF۴۰-۷۰ D۰۰۲PMS	خطای در استارت پمپ‌های سیستم UF
۱۲	VE۲۱-۴۱ D۰۰۱PMR	خطای حین کار پمپ‌های سیستم VE
۱۳	VJ۲۱-۴۱ D۰۰۱PMR	خطای حین کار پمپ‌های سیستم VJ
۱۴	UF۴۰-۷۰ D۰۰۲PMR	خطای حین کار پمپ‌های سیستم UF
۱۵	CCF-TJ۶۱ ،۲S۰۰۲	خطای حالت مشترک برای شیرهای TJ۶۱ (۶۲) S۰۰۲
۱۶	TJ۶۱ ،۲S۰۰۲VCO	خطا در باز شدن شیرهای یک‌طرفه‌ی TJ۶۱ (۶۲) S۰۰۲



شکل ۳. درخت خطای اصلی سیستم پاشش آب ترسیم شده توسط نرم‌افزار سفیر.

www.SID.ir

- مدل‌سازی احتمال خرابی سیستم پاشش آب بدون در نظر گرفتن خرابی با عامل مشترک انجام و احتمال کلی خرابی سیستم برابر با $۳٫۲۷۹\times۱۰^{-۳}$ به دست آمد. اختلاف ٪۸۳ نسبت به احتمال کلی خرابی، حاکی از مهم بودن تأثیر خرابی با عامل مشترک در مدل‌سازی‌های PSA است؛
- برای تعیین تأثیر حادثه‌ی افت قدرت خارج از سایت (LOOP)[۱۱] در احتمال کلی خرابی سیستم، مدل‌سازی بدون در نظر گرفتن حادثه‌ی افت قدرت خارج از سایت انجام و احتمال کلی خرابی سیستم ٪۸۱ کاهش یافت و برابر با $۳٫۵۰۳\times۱۰^{-۳}$ محاسبه شد. کاهش ٪۸۱، اهمیت حادثه‌ی افت قدرت خارج از سایت را نشان می‌دهد؛
- با نادیده گرفتن و حذف خطای انسانی در مدل‌سازی احتمال کلی خرابی سیستم پاشش آب برابر با $۳٫۴۹۹\times۱۰^{-۳}$ محاسبه شد، که میزان ٪۸۱ کاهش را نشان می‌دهد و این نمایان‌گر اهمیت خطای انسانی در PSA است.

۴. نتایج

- همان‌گونه که در جدول ۱ درج شده است، در اولویت‌های اول، مولدهای دیزلی (DG) و فعالیت‌های تعمیراتی نظیر تعمیر سیستم آب صنعتی برای خنک کردن مصرف‌کننده‌های مهم[۱۲] VE، تعمیر سیستم خنک‌کننده‌ی مولد دیزلی[۱۳] VJ، تعمیر سیستم تأمین تبرید (چیلر)[۱۴] UF و خطای کلیدهای تأمین‌کننده‌ی برق قرار دارند. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد به رغم تصور اولیه، سیستم‌ها و تجهیزهایی که در شکل ۱ آورده شده‌اند و تجهیزها و عنصرهای اصلی سیستم پاشش آب محسوب می‌شوند، از نظر تأثیر در خطای کلی سیستم پاشش آب با اهمیت‌ترین نیستند، بلکه سیستم‌ها و تجهیزهای پشتیبان (اگر چه جزء عنصرهای اصلی سیستم پاشش آب نیستند) از اهمیت بسیار بیش‌تری برخوردارند. به عنوان مثال مولدهای دیزلی سیستم تأمین برق اضطراری DG و سیستم تأمین آب خنک‌کن VE بیش‌ترین اهمیت را دارند.
- در مدل‌سازی انجام شده توسط پیمانکار برخی تجهیزها نظیر شیرهای S۰۰۴ (۲۰, ۳۰, ۴۰) TH۱۰ و S۰۰۳ (۲۰, ۳۰, ۴۰) TH۱۰ و تانک B۰۰۱, ۰۰۲ (۲۰, ۳۰, ۴۰) TH۱۰ لحاظ نشده بودند. تحلیل اهمیت نشان داد که این عناصر از اهمیت چندانی برخوردار نیستند و در ردیف‌های انتهایی جدول تحلیل اهمیت قرار می‌گیرند.
- خطا در کارکرد مولدهای دیزلی، سیستم کلید زنی برق اضطراری، هم‌چنین در دسترس نبودن سیستم آب صنعتی برای خنک کردن مصرف‌کننده‌های مهم VE (به علت تعمیرها)، سیستم تأمین تبرید برای مصرف‌کننده‌های ایمن سیستم‌های تهویه‌ی UF، سیستم بسته‌ی خنک‌کننده‌ی آبی VJ، سیستم تأمین برق PS، بیش‌ترین اهمیت در خطای سیستم پاشش آب را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1. Probabilistic Safety Analysis
2. Three Mile Island
3. Saphire
4. Risk Spectrum
5. Common Cause Failure
6. Alpha Factor Mode
7. Pre- Initiators
8. Fussel- Vesely
9. Risk Increase
10. Risk Decrease
11. Loss of Off-Site Power
12. Service Cooling Water System for Secured Closed Cooling Water Systems
13. Refrigeration Supply System of Secured Consumers of Ventilation Systems
14. Secured Closed Cooling Water System

مرجع‌ها

[1] V. khorrami, Using PSA method in reliability asseessment of emergency power supply of bushehr nuclear power plant and analyse of staion blackout accident, M.S. thesis, Sharif University, (1389).

[2] S. kordalivand, Analyse of inadvertent opening using PSA method and SAPHIRE code, M.S. thesis, Sharif University, (1393).

[3] Atomenergoproekt, Final Safety Analysis Report, Chapter 6, FSAR, Moscow, Editor. (2008).

[4] Atomenergoproekt, BNPP Probabilistic Safety Assessment, level 1, revision 3, state research, Design and Engineering Survey Institute, (2003).

[5] K.J. Kvarfordt, S.T. Wood, C.L. Smith, Systems Analysis Programs for Hands-On Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) Code Reference Manual, INL/EXT-05-00644 Rev. 1, August (2008).

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir