

ارزیابی احتمالاتی ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران با در نظر گرفتن خطای انسانی

محدثه حجتی^۱، حسین خلفی^۲، محمود صداقتی زاده^۱، سیدمحمد میروکیلی^۲^۱دانشکده علوم دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، سید خندان، تهران^۲پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، امیرآباد شمالی، تهران

چکیده

خاموشی آنی اضطراری یکی از رویدادهای مهم در راکتورهای هسته ای است. بررسی کمی و کیفی این واقعه و همچنین تعیین فاکتورهای اصلی به وجود آورنده آن در ارزیابی ایمنی راکتور اهمیت به سزایی دارد. در این تحقیق قابلیت اطمینان راکتور تهران، از روش ارزیابی احتمالاتی ایمنی و احتمال خطای انسانی، از روش SPAR-H مورد مطالعه قرار گرفته است. درخت خطاهای مربوط به خاموشی آنی اضطراری که ناشی از خرابی سخت افزار و خطای انسانی است با استفاده از نرم افزار SAPHIRE ترسیم گردید. در پایان احتمالهای مربوط به هر قسمت محاسبه و نتیجه برای احتمال خاموشی آنی اضطراری کل سیستم حدود 10^{-2} بدست آمد.

PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT OF TEHRAN RESEARCH REACTOR
CONSIDERING HUMAN ERRORHojati, Mohadese¹; Khalafi, Hossein²; Sedaghati Zadeh, Mahmoud¹; Mirvakili, seyed Mohammad²¹ Department of Science, University of K. N. Toosi University of Technology, seyed khandan, Tehran² Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran

Abstract

One of the major events in nuclear reactors is scram or immediate emergency shutdown. Qualitative and quantitative study of this event, as well as the main causative factors in evaluating reactor safety is an important point. In this study, safety of Tehran research reactor is assessed probabilistically and the human error possibility is evaluated using SPAR-H method. In this regard, scram fault tree associated with hardware failures and human errors are drawn by using SAPHIR software. The calculated total scram possibility is found to be $1E-2$.

PACS No. 28

آن‌ی اضطراری و تعیین فاکتورهای اصلی به وجود آورنده، در ارزیابی ایمنی راکتور اهمیت به سزایی دارد. از طرفی امروزه انسان با نظارت بر عملکرد سیستم‌ها به عنوان طراح، برنامه ریز و کاربر نقش بسیار مهمی در ایمنی صنعتی دارد. رفتار یک کاربر با یک سیستم پیچیده مثل راکتور، پتانسیل بروز خطاها و اشتباهاتی را دارد، که می‌تواند حوادثی مانند چرنوبیل و تری مایلند را به وجود آورد [۱]. برای خطای انسانی در ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم، مدل‌های مختلفی ارائه گردیده است. به طور نمونه

مقدمه

یکی از رویدادهای مهم در راکتورهای هسته ای، سیستم خاموشی آنی اضطراری است که سیستم حفاظت راکتور، کنترل آنرا بر عهده دارد. سیستم حفاظت بطور اتوماتیک در مواقع بحرانی با فرستادن سیگنال خاموشی آنی اضطراری، باعث قطع شدن جریان مگنت میله‌های کنترل و افتادن سریع میله‌ها به درون قلب راکتور شده، و منجر به خاموشی آنی اضطراری راکتور می‌شود. بنابراین شناخت سیستم حفاظت و بررسی کمی و کیفی خاموشی

وضرایب احتمال مربوط به آنها وجود دارد، که طبق شرایط کار، جدول پر می شود. اعداد بدست آمده از جدول نامبرده را در فرمول ۱ گذاشته و سپس عدد بدست آمده را در فرمول ۲ جایگذاری کرده و احتمال خطای انسانی را بدست می آوریم [۵].

جدول ۱: لیست سیگنالهای خاموشی آنی اضطراری راکتور تهران

ردیف	سیگنال خاموشی آنی اضطراری	سیگنال ترکیبی	شرط عملکرد
۱	سطح قدرت بیش از ۵/۵ مگاوات	منطق ۲ از ۳ کانال ایمنی	۱۱۰ درصد قدرت نامی راکتور
۲	قفل نبودن پل روی استخر	ندارد	باز بودن قفل
۳	داشتن پریود افزایش قدرت کمتر از ۷ ثانیه	۲ درصد قدرت	کمتر از ۷ ثانیه
۴	زلزله	ندارد	بیشتر از ۴ ریشتر
۵	باز شدن بی موقع دریچه ایمنی	۲ درصد قدرت	باز بودن
۶	تابش بیش از حد مجاز	ندارد	زیاد بودن تشعشع
۷	کاهش آب استخر در حدود	ندارد	کمتر از ۱۳۶ اینچ
۸	دمای بیش از حد مجاز در ورودی قلب	ندارد	بیش از ۴۶ درجه سلسیوس
۹	فشار دادن دکمه های توقف راکتور	ندارد	فعالسازی بوسیله اپراتور
۱۰	کاهش جریان مدار خنک کننده	۲ درصد قدرت	کاهش ۱۰٪ از مقدار اصلی
۴	قطع تغذیه پمپ مدار اولیه	ندارد	قطعی برق پشت کنتاکتور

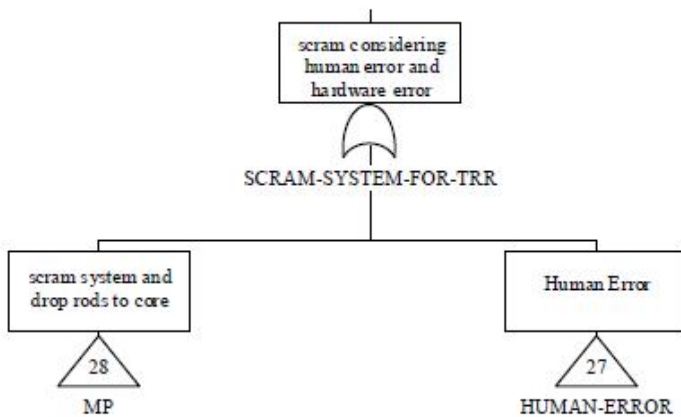
پس از رسم درخت خطا با استفاده از نرم افزار SAPHIRE، فرکانس وقوع تک تک رویدادهای نامبرده در جدول بدست آمد که در جدول ۳ نتایج آنها آمده است. شکل ۱ درخت خطای راکتور تهران را نشان می دهد که از یک گیت OR با دو زیرشاخه خطای انسانی و خطای سخت افزاری تشکیل شده است. خطای انسانی خود شامل دو زیر شاخه خطای ناشی از عکس العمل و خطای ناشی از تشخیص انسان می باشد. درخت خطای انسانی در شکل ۲، درخت خطای سخت افزاری در شکل ۳ و درخت خطای ناشی از تشخیص انسان در شکل ۴ مشاهده می گردد. درختان خطای انسانی با استفاده از مرجع [۲] و خطای سخت افزاری با استفاده از مرجع [۵] رسم شده است.

در مدل THERP از جداول احتمال خطای انسانی براساس داده های جمع آوری شده از حوزه های مختلف، خطای انسانی بررسی می شود. استفاده از مدل THERP در نیروگاه های هسته ای توصیه شده است [۲]. همچنین در سال ۲۰۱۰ مقاله ای تحت عنوان طراحی مدلی برای آهنگ خاموشی راکتور هسته ای قدرت، با سیستم حفاظت دیجیتال، با در نظر گرفتن خطای سخت افزار و خطای انسان ارائه گردید. در این مقاله کمیته معرفی می گردد که رابطه ی بین احتمال خطای انسانی، احتمال خطای ناشی از خرابی اجزای سخت افزاری و احتمال خطای تست دوره ای را بیان می کند و از آن برای مقایسه احتمالات مربوطه در بازه های زمانی مختلف استفاده می کند [۳]. راکتور تهران یکی از مهمترین نیروگاههای کشور در زمینه تحقیقات هسته ای است. هدف در این مقاله محاسبه احتمال کلی خاموشی آنی اضطراری این راکتور، با در نظر گرفتن خطای انسانی و خطای سخت افزاری، با روش ارزیابی ایمنی احتمالاتی می باشد. در این تحقیق، سیستم حفاظت و اجزای سیستم کنترل و ابزار دقیق راکتور به طور کامل بررسی گردید. نقش هر یک از این اجزا در حوادث نامطلوب تعیین، و درخت خطا رسم، و به تجزیه و تحلیل منطقی و کمی برای حوادث پرداخته شد. جدول ۱ لیست مواردی که باعث خاموشی آنی اضطراری راکتور تهران می شوند را نشان می دهد. در این مقاله برای محاسبه احتمال خطای انسانی از روش SPAR-H استفاده می شود که در سال ۲۰۰۵ توسط Blackman و همکارانش ارائه شد. در این روش فاکتورهایی که بر روی خطای انسانی نقش دارند، فاکتورهای مشخصی هستند که هر یک دارای سطوحی است، و هر سطح شامل آهنگ شکست مشخصی است که در جدول ۲ نمایش داده شده است [۴]. سطح اسمی، سطحی است که حداکثر بازدهی بین فاکتور مورد نظر و خطای انسانی وجود دارد. برای هر فاکتوری یک سطح اسمی وجود دارد، حاصلضرب همه احتمالاتها وقتی که در سطوح اسمی باشند را شرایط ایده آل با بهترین بازدهی می گویند، و احتمال خطای انسانی در شرایط ایده آل را با NHEP نشان می دهند. برای هرکاری که توسط انسان تحت عنوان تست، تعمیر و نگهداری انجام می گیرد، می توان جدولی رسم کرد که در آن فاکتورهای خطای انسانی و سطوح وابسته به آنها

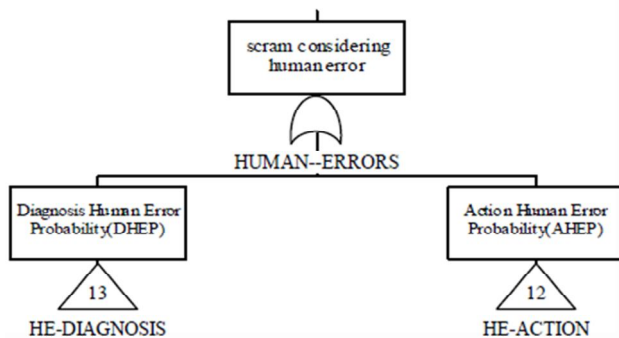
$$HEP = \frac{NHEP \cdot PSF_{Composite}}{NHEP \cdot (PSF_{Composite} - 1) + 1} \quad (2)$$

جدول ۲: روش ماتریس مطابقت فاکتورهای تاثیر گذار در خطای انسانی با

استفاده از روش SPAR-H



شکل ۱: درخت خطای سیستم سخت افزار و خطای انسانی



شکل ۲: درخت خطای انسانی (ناشی از عکس العمل و تشخیص)

پس از قرار دادن داده های نمونه برای فرکانس حوادث اولیه یک راکتور تحقیقاتی که در مراجع [۶] و [۷] آمده است نتایج جدول ۳ بدست آمد:

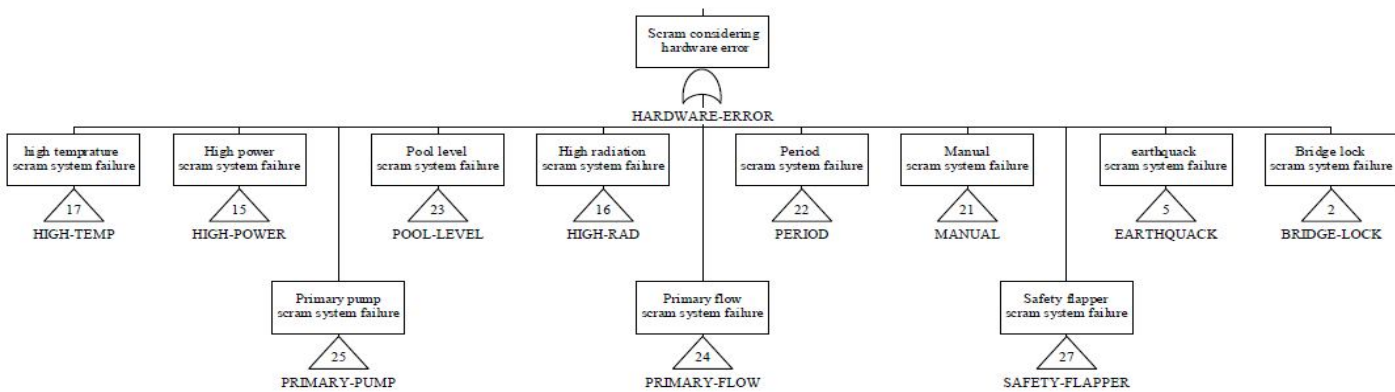
جدول ۳: نتایج حاصل از محاسبات نرم افزار SAPHIR

Probability(1/demand)	Fault tree name	no
1.142E-4	BRIDGE-LOCK	1
1.000E-7	EARTHQUAKE	2
1.424E-6	HIGH-POWER	3
1.000E-1	HIGH-RADIATION	4
9.701E-3	HIGH-TEMPERATURE	5
5.000E-1	MANUAL-SCRAM	6
3.686E-3	PERIOD	7
1.241E-2	POOL-LEVEL	8
2.294E-3	PRIMARY-FLOW	9
2.784E-3	PRIMARY-PUMP	10
1.645E-3	SAFTY-FLAPPER	11

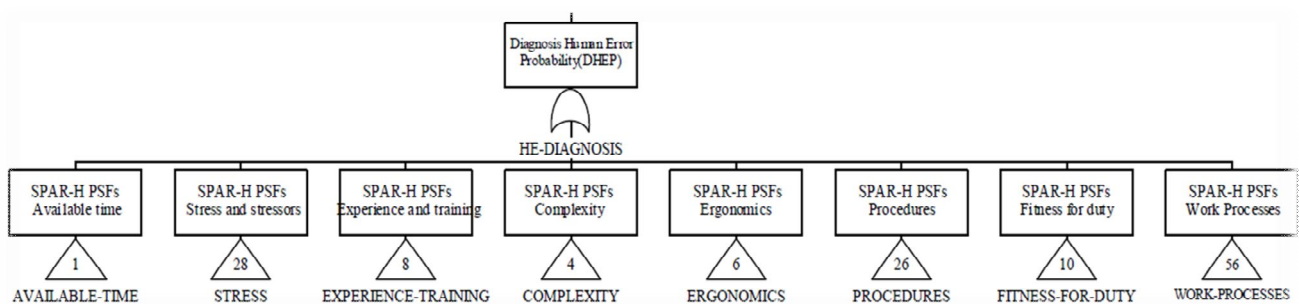
ردیف	فاکتورهای تاثیر گذار در خطای انسانی	سطوح فاکتورهای تاثیر گذار در خطای انسانی	ضرایب احتمال شکست
۱	زمان در دسترس	زمان ناکافی	۱
		زمان در دسترس = زمان تعمیرات	۱۰
		زمان اسمی	۱
		زمان در دسترس $\times 5 \geq$ زمان تعمیرات	۰/۱
۲	استرس / شرایط استرس زا	بی نهایت	۵
		زیاد	۲
۳	پهچیدگی	اسمی	۱
		پهچیدگی بالا	۵
		پهچیدگی متوسط	۲
۴	تجربه / آموزش	کم	۳
		اسمی	۱
		زیاد	۰/۵
۵	روش	در دسترس نبودن	۵۰
		ناکامل	۲۰
		قابل دسترس، اما ضعیف	۵
		اسمی	۱
۶	ارگونومی HMI	گم کردن / از راه اصلی گمراه می کند	۵۰
		ضعیف	۱۰
		اسمی	۱
		خوب	۰/۵
۷	تناسب برای وظیفه	نامناسب	۰/۱
		پایین تر از مقدار تناسب	۵
		اسمی	۱
۸	پروسه کار	ضعیف	۲
		اسمی	۱
		خوب	۰/۸

فرمولهای (۱) و (۲) نحوه محاسبه خطای انسانی را نشان می دهد :

$$NHEP \times PSF_{Composite} = NHEP \times (\text{زمان در دسترس}) \times (\text{تجربه و آموزش}) \times (\text{پهچیدگی}) \times (\text{استرس و شرایط استرس زا}) \times (\text{پروسه کار}) \times (\text{تناسب برای وظیفه}) \times (\text{آرگونومی}) \times (\text{روش})$$



شکل ۳: درخت خطای سخت افزاری (مثلث هایی که درون شان عدد نوشته شده است نشان دهنده این است که، هر یک از رویدادها زیر شاخه هایی دارند که بدلیل کمبود جا از آوردن آنها صرف نظر شده است)



شکل ۴: درخت خطای انسانی تشخیصی (درخت خطای ناشی از عکس العمل مانند همین شکل است که بدلیل کمبود جا از آوردن آنها صرف نظر شده است)

بودن خطای انسانی نسبت به خطای سخت افزاری ضرورت مطالعه هر چه بیشتر خطای انسانی را نشان می دهد. در پایان فرکانس خاموشی آنی اضطراری راکتور تهران با در نظر گرفتن خطای سخت افزاری و خطای انسانی حدود 10^{-2} بدست آمد.

مرجع ها

- [۱] حاجی حسینی علیرضا؛ مهندسی خطای انسانی؛ نشر فن آوران؛ تهران؛ ۱۳۸۹
- [2] NUREG/CR-6883; The SPAR-H Human Reliability Analysis Method; 2005
- [3] M. Khalaqzaman, Hyun Gook Kang, Man Cheol Kim, Poong Hyun seong; "A model for estimation of reactor spurious shut down rate considering maintenance human errors in reactor protection system of nuclear power plant"; Korea; 2010
- [۴] محدثه حجتی، حسین خلفی، محمود صدراقتی زاده، سید محمد میروکیلی، ۱۳۹۲، محاسبه فرکانس خاموشی آنی اضطراری یک راکتور تحقیقاتی با در نظر گرفتن خطاهای سخت افزاری و انسانی، نخستین کنفرانس مهندسی فرآیند، تهران، مرکز همایشهای صدا و سیما.
- [5] AEOI. Safety Analysis Report For Research reactor of Tehran, 2009
- [6] IAEA-TECDOC-478/ Component Reliability Data for Use In Probabilistic Safety Assessment; 1988
- [7] IAEA-TECDOC-930/ Generic component reliability data for research reactor PSA; 1997

همانطور که از جدول ۳ ملاحظه می شود، بیشترین احتمال خاموشی آنی اضطراری مربوط به ۱- خاموشی دستی توسط اپراتور ۲- تابش بیش از حد مجاز و ۳- پایین آمدن بیش از حد آب استخرمی باشد [۴]. اما با توجه به داده های کاری راکتور که در طی ۳۲ سال گذشته رخ داده است، بیشترین فرکانس مربوط به ۱- قطع برق شبکه، ۲- پریدود کوتاه راکتور و ۳- خاموشی دستی توسط اپراتور می باشد. که این نتایج عدم همخوانی داده های کاری راکتور تهران با داده های جهانی را نشان می دهد.

نتیجه گیری

پس از حل نمودن درخت خطاها توسط نرم افزار SAPHIRE، احتمال خاموشی آنی اضطراری ناشی از خطای سخت افزار کل سیستم حفاظت راکتور تهران، تقریباً برابر 10^{-6} بدست آمد، که با استاندارد جهانی 10^{-6} هم خوانی خوبی دارد، و برای خطای انسانی در شرایط اسمی 10^{-2} محاسبه گردید. ده هزار برابر