بررسی احتمالاتی افزایش ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران پس از تجهیز آن به سامانه خاموشی دوّم

احسان بوستانی*[۱]، صمد خاکشورنیا[۲]

[۱]سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

[۲]سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده:

یکی از راه‌های افزایش ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران تجهیز آن به سامانه خاموشی دوم است. یک سامانه خاموشی دوم با درنظر گرفتن الزامات ایمنی، نوترونی، بهره‌برداری و دیگر محدودیت‌های آن طراحی شده است. این سامانه مستقل و متفاوت از سامانه خاموشی اول این راکتور بوده و توانایی زیربحرانی کردن راکتور، هنگامی که سامانه خاموشی اول در دسترس نباشد، را دارد. در این مطالعه، تاثیر این تجهیز در افزایش ایمنی راکتور با استفاده از سطح ۱ تحلیل ایمنی احتمالاتی (PSA) *و به کارگیری کد* SAPHIRE *بررسی شده است. پس از تجهیز راکتور به این سامانه، آهنگ خرابی سامانه خاموشی راکتور به اندازه* $۳/۲۰\times۱۰^{-۴}$ *بر سال کاهش یافته و از عدد* $۹/۵۰ \times ۱۰^{-۵}$ *بر سال به عدد* $۳/۰۴\times۱۰^{-۸}$ *بر سال رسیده است.*

کلیدواژه: راکتور تحقیقاتی تهران، تحلیل ایمنی احتمالاتی (*PSA*)، ایمنی، سامانه خاموشی دوم، کد *SAPHIRE*

مقدمه:

ارتقا یا بهینه‌سازی بخش‌های مختلف یک راکتور می‌تواند به عنوان برنامه‌هایی در جهت افزایش ایمنی راکتور انجام شود. از جمله این اقدامات در دیگر نقاط جهان می‌توان به نصب یک سامانه فرمان دوم[۱] در راکتور نور (NUR) و اضافه کردن یک میله کنترل به عنوان سامانه خاموشی دوم[۲] در راکتور FRM- II اشاره کرد [۱, ۲]. سامانه خاموشی دوم به عنوان بخشی از سامانه حفاظتی راکتور[۳] یکی از گزینه‌ها در جهت افزایش ایمنی یک راکتور تحقیقاتی از جمله راکتور تحقیقاتی تهران است. بسته به مشخصات و ویژگی‌های هر راکتور، مولفه‌های زیادی وجود دارند که

[1] Second Trip System (STS)
[2] Second Shutdown System (SSS)
[3] Reactor Protection System (RPS)

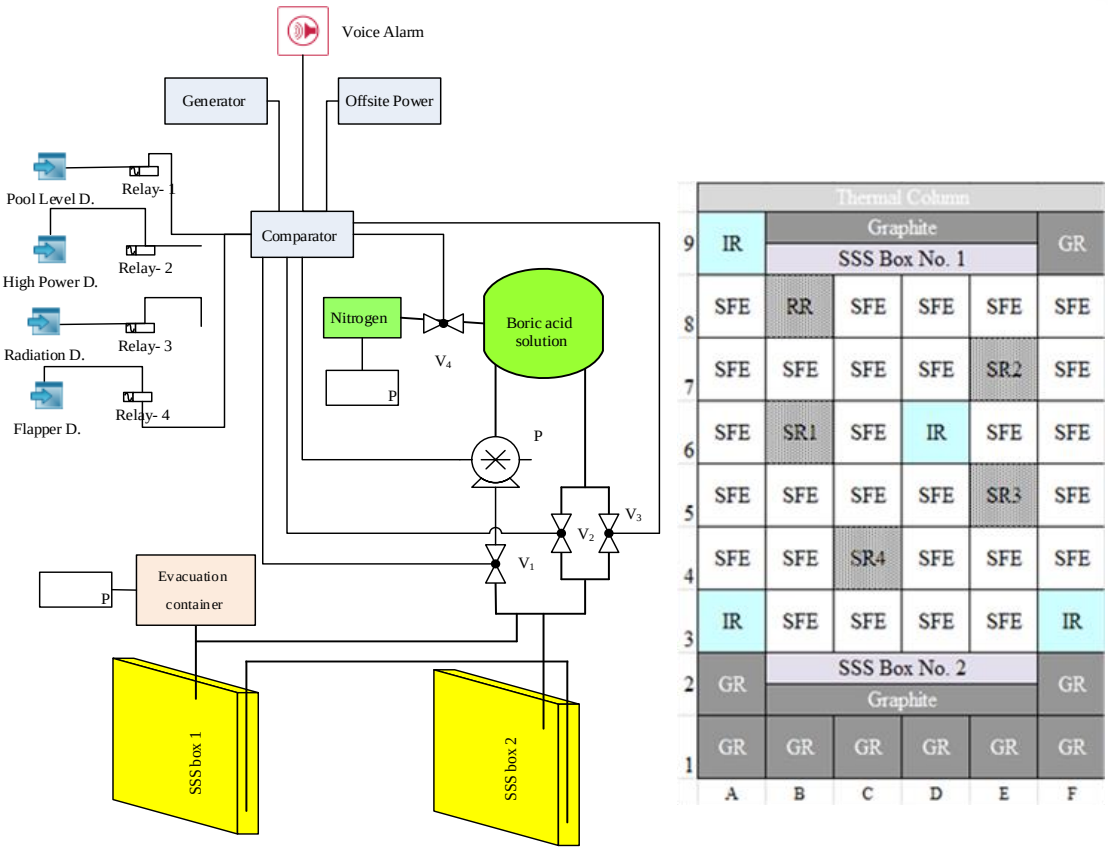
برای طراحی یک سامانه خاموشی دوم باید درنظر گرفته شوند. باتوجه به اینکه راکتور تحقیقاتی تهران تنها به سامانه خاموشی اول[1] مجهز است، با لحاظ کردن کمترین تغییرات در راکتور تحقیقاتی تهران، یک سامانه خاموشی دوم طراحی شده است که همه الزامات و قیدهای ایمنی موجود را برآورده کرده است. برای نشان دادن عددی تاثیر این طرح در افزایش ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران، آهنگ خرابی سامانه خاموشی پس از تجهیز آن به سامانه خاموشی دوم محاسبه و با مقدار آن پیش از نصب این سامانه مقایسه شده است.

روش کار:

راکتور تحقیقاتی تهران، یک راکتور استخر باز با سوخت صفحه‌ای، کندکننده و خنک‌کننده آب سبک با جهت حرکت از بالا به پایین است. توان نامی آن ۵ مگاوات و کاربردهای آن در زمینه‌های گوناگون ازجمله تولید رادیونوکلیدها، آموزش و تحقیق است. قلب آن از یک آرایه ۹×۶ تشکیل شده است که ۵ محل آن به سامانه خاموشی اول اختصاص دارد. سامانه خاموشی اول در بالای قلب قرار گرفته و میله‌های آن هنگام فعال شدن براثر نیروی گرانش در مدت زمانی کمتر از ثانیه به داخل قلب سقوط می‌کنند. ۴ محل برای تیغه‌های مربوط به میله‌های خاموشی آنی[2] و ۱ محل به تیغه‌های مربوط به میله تنظیمی[3] اختصاص دارد [۳].

طراحی یک سامانه خاموشی دوم در قلب راکتور تحقیقاتی تهران با دو محدودیت عمده مواجه است: اولین محدودیت اندازه کوچک قلب است که سبب کوچک بودن فضای اطراف و داخل قلب برای هرگونه جانمایی و طراحی سامانه خاموشی دوم است. دومین محدودیت، اشغال بودن فضای اطراف قلب با کانال‌های پرتودهی[4]، لوله‌های پرتاب نمونه[5] و ستون حرارتی است که ۳ جهت از ۴ سمت موجود قلب را اشغال کرده‌اند. یک جهت باقیمانده، همان‌گونه که از سمت راست شکل (۱) قابل دیدن است، به‌دلیل اینکه قلب در آن جهت حاوی دو ردیف بازتابنده گرافیتی است، از نظر نوترونی بسیار کم ارزش است. با درنظر گرفتن این محدویت‌ها، یک سامانه خاموشی دوم با مکانیزم عملکردی کاملا متفاوت از سامانه خاموشی اول طراحی شده است. این سامانه با تزریق جاذب نوترون مایع به درون محفظه‌هایی در ردیف‌های ۲ و ۹ قلب، سبب زیربحرانی شدن راکتور می‌شود.

[1] First Shutdown System (FSS)
[2] Shim Safety Rods (SSRs)
[3] Regulating Rod (RR)
[4] Bean tubes
[5] Rabbits



شکل (۱). آرایش قلب راکتور پس از جانمایی سامانه خاموشی دوم (راست) و سامانه خاموشی دوم (چپ)

این سامانه، همان‌گونه که از سمت چپ شکل (۱) دیده می‌شود، شامل آشکارسازهای پایش اطلاعات قلب، مقایسه‌گر اطلاعات دریافتی و مکانیزم تزریق جاذب جهت خاموشی راکتور است. دستور خاموشی درصورتی‌که مقادیر پایش شده از حدود ایمنی تجاوز کند صادر می‌شود. مشخصات این سامانه در جدول(۱) آمده است.

جدول(۱). مشخصات سامانه خاموشی دوم طراحی شده

کمیت	مقدار
ضخامت دیواره (میلی‌متر)	۲
جنس دیواره	آلومینیوم-۶۰۶۱
ارتفاع، طول و پهنا (میلی‌متر مکعب)	۳۰ × ۳۲۰ × ۷۰۳
حجم کل هر دو محفظه (لیتر)	۱۱/۴۹
جاذب مایع مورد استفاده	اسید بوریک غنی شده
زمان عملکرد (ثانیه)	کمتر از ۴
حاشیه خاموشی (pcm)	بیشتر از ۱۰۰۰

نرم افزار SAPHIRE[1] یک برنامه تحلیل ایمنی است که برای براورد اعتمادپذیری کلی یک سامانه استفاده می‌شود. این برنامه امکان بررسی اطلاعات مربوط به رویدادهای پایه، تولید درخت خطا و رویداد، انجام تحلیل عدم قطعیت و تهیه گزارش را فراهم می‌کند [۴]. در این تحقیق، آهنگ خرابی سامانه خاموشی راکتور تهران قبل و پس از تجهیز آن به سامانه خاموشی دوم با استفاده از این برنامه محاسبه شده است.

نتایج:

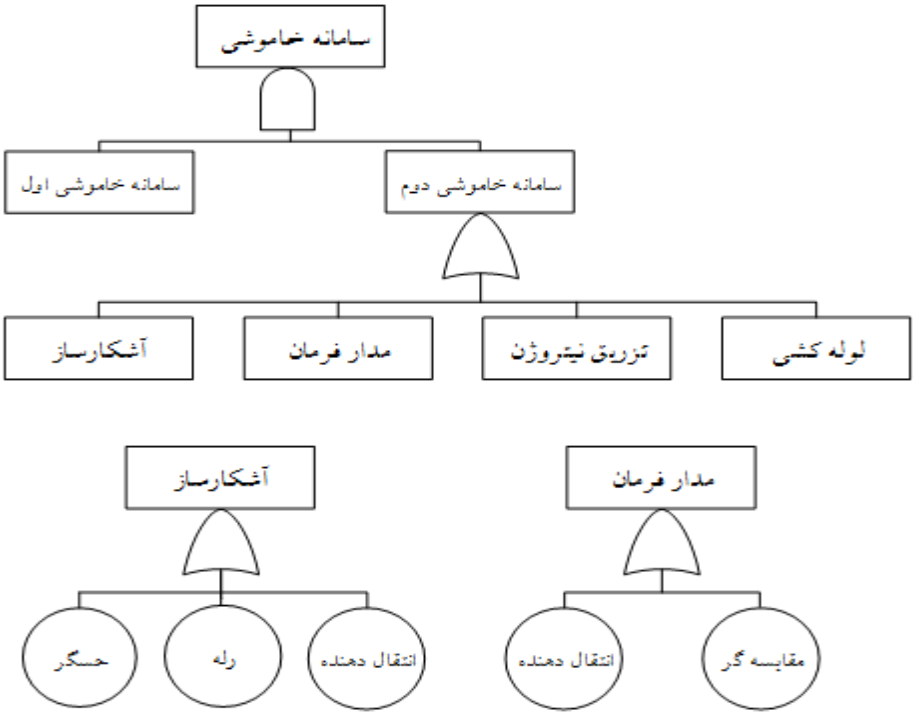
اولین مرحله در انجام تحلیل احتمالاتی کمی یک سامانه تعیین آهنگ خرابی اجزای مختلف آن است. اطلاعات مربوط به آهنگ خرابی اجزای مختلف بخشی مهم از ارزیابی است، چراکه کیفیت یک تحلیل ایمنی به کیفیت اطلاعات استفاده شده در آن بستگی دارد. احتمال خرابی محافظه‌کارانه[2] برای اجزای سامانه خاموشی دوم با درنظر گرفتن حالت بدبینانه[3] از مراجع گوناگون جمع‌آوری و در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲). احتمال خرابی اجزای سازنده سامانه خاموشی دوم

قطعه	احتمال خرابی (بر رویداد)	مرجع
هشداردهنده (Alarm)	$۱/۸۴ \times ۱۰^{-۳}$	[۵]
مقایسه‌گر (Comparator)	$۳/۰۸ \times ۱۰^{-۳}$	[۶]
رله (Relay)	$۳/۰۰ \times ۱۰^{-۴}$	[۵]
حسگر (Sensor)	$۵/۱۰ \times ۱۰^{-۳}$	[۵]
نشت از سوپاپ (Valve leakage)	$۵/۴۰ \times ۱۰^{-۳}$	[۷]
نشت از لوله (Pipe leakage)	$۳/۶۰ \times ۱۰^{-۶}$	[۵]
انتقال‌دهنده (Transmitter)	$۴/۵۶ \times ۱۰^{-۵}$	[۷]

نمودار کلی درخت خطا برای از کار افتادن سامانه خاموشی راکتور و دو تا از اجزای آن در شکل (۲) آمده است. همان‌طورکه در قسمت بالای شکل (۲) دیده می‌شود، از کار افتادن سامانه خاموشی راکتور هنگامی اتفاق می‌افتد که هر دو سامانه خاموشی اول و دوم عمل نکنند. همچنین بروز خطا در سامانه خاموشی دوم ناشی از ۴ عامل نشان داده شده در این قسمت از شکل است. عوامل بروز خطا در مدار فرمان و آشکارساز در قسمت پایین شکل (۲) نشان داده شده است.

[1] Safety Analysis Program for Hands-on Integrated Reliability Estimation
[2] Conservative
[3] Pessimistic



شکل (۲). درخت خطا برای سامانه خاموشی راکتور (بالا) و مدار فرمان و آشکارساز (پایین)

پس از تعیین آهنگ خرابی اجزای سامانه خاموشی، دومین گام مشخص کردن بسامد رخداد رویدادهای آغازگر است. برای به سامانه خاموشی راکتور، باتوجه به بررسی حوادث در این راکتور و کارهای پژوهشی دیگر [۸]، ۶ رویداد آغازگر انتخاب و برای آنها آهنگ خرابی سامانه خاموشی راکتور محاسبه و در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳). آهنگ خرابی سامانه خاموشی راکتور تحقیقاتی تهران

رویداد آغازگر	بسامد (بر سال)	مرجع	آهنگ خرابی (بر سال)	
			سامانه خاموشی اول	سامانه خاموشی اول و دوم
خطای کارگردانی	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۲}$	[۹]	$۲/۲۱ \times ۱۰^{-۷}$	$۶/۴۸ \times ۱۰^{-۱۱}$
قطع برق سراسری	$۴/۳۲ \times ۱۰^{-۱}$	[۱۰]	قابل چشم پوشی	$۵/۹۳ \times ۱۰^{-۶}$
سقوط جسم درون قلب	$۹/۴۶ \times ۱۰^{-۵}$	[۸]	$۹/۴۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۵/۵۶ \times ۱۰^{-۱۰}$
تزریق راکتیویته	$۳/۴۰ \times ۱۰^{-۴}$	[۸]	قابل چشم پوشی	$۵/۵۲ \times ۱۰^{-۶}$
باز شدن نابجای شیر ایمنی[1]	$۳/۴۰ \times ۱۰^{-۴}$	[۸]	$۸/۹۶ \times ۱۰^{-۹}$	$۸/۹۳ \times ۱۰^{-۱۴}$
جمع			$۹/۵۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۰۴ \times ۱۰^{-۸}$

[1] Flapper valve

همان‌گونه که از نتایج ارایه شده در جدول (۳) دیده می‌شود، هنگامی‌که راکتور تحقیقاتی تهران به سامانه خاموشی دوم تجهیز شده باشد، آهنگ خرابی کل سامانه خاموشی راکتور به میزان $۳/۲۰ \times ۱۰^{-۴}$ بر سال کمتر از زمانی است که این راکتور تنها مجهز به سامانه خاموشی اول است.

بحث و نتیجه‌گیری:

به دلیل ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و کارکردهای خاص راکتور تحقیقاتی تهران، یک سامانه خاموشی دوم برای افزایش ایمنی این راکتور طراحی شده است. این سامانه برای داشتن بالاترین استانداردهای ایمنی از اجزا، ساختار و کارکرد کاملا مستقل و متفاوت از سامانه خاموشی اول برخوردار است. برای نشان دادن عددی افزایش ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران پس از تجهیز آن به سامانه خاموشی دوم، سامانه خاموشی این راکتور با استفاده از کد SAPHIRE تحلیل ایمنی احتمالاتی شده است. آهنگ خرابی سامانه خاموشی راکتور پس از تجهیز آن به سامانه خاموش دوم به میزان قابل توجهی کاهش یافته و از مقدار $۹/۵۰ \times ۱۰^{-۵}$ بر سال به مقدار $۳/۰۴ \times ۱۰^{-۸}$ بر سال رسیده است که نشان‌دهنده افزایش ایمنی این راکتور پس از تجهیز آن به این سامانه است.

مراجع:

1. Tseng, C., *Second Trip System for NRU Research Reactor,* Nuclear Engineering and Design, 1994. 152(1): p. 175-181.
2. Böning, K. and J. Blombach, *Design and Safety Features of the Planned Compact Core Research Reactor FRM-II*, 1995.
3. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*, 2009. Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.
4. Kvarfordt, K.J., S. T. Wood, and C.L. Smith, *Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations*. July 2006, Idaho National Laboratory.
5. IAEA, *Component reliability data for use in probabilistic safety assessment*, IAEA-TECDOC-478, 1988.
6. Aneziris, O., et al., *Probabilistic safety analysis of a Greek Research Reactor,* Annals of Nuclear Energy, 2004. 31(5): p. 481-516.
7. IAEA, *Survey of ranges of component reliability data for use in probabilistic safety assessment,* IAEA-TECDOC-508, 1989.
8. Ghofrani, M. and S. Damghani, *Determination of the safety importance of systems of the Tehran research reactor using a PSA method,* Annals of Nuclear Energy, 2002. 29(16): p. 1989-2000.
9. IAEA, *Case study on the use of PSA methods: Determining safety imporatnce of systems and components at nuclear power plants,* IAEA-TECDOC-590, 1991.
10. Faghihi, F., et al., *Level-1 probability safety assessment of the Iranian heavy water reactor using SAPHIRE software,* Reliability Engineering & System Safety, 2008. 93(10): p. 1377-1409.

Probabilistic analysis of increasing safety in Tehran research reactor after equipping it with the second shutdown system

Ehsan Boustani[1*], Samad Khakshournia[2]

Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), NSTRI, Reactor and nuclear safety school, Tehran, Iran
Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), NSTRI, Physics and accelerator school, Tehran, Iran

Abstract:

One of methods for increasing the Tehran Research Reactor (TRR) safety is equipping it with the Second Shutdown System (SSS). One SSS is designed for it regarding the safety, neutronic, operational and other limitations. This system is independent and diverse from First Shutdown System (FSS) and having the capability of transfer the reactor to a subcritical state following unavailability of the FSS. In this research, the effect of this equipment on enhancing the reactor safety studied using the level 1 of Probabilistic Safety Analysis (PSA) by SAPHIRE code. After equipping the reactor with SSS, the failure rate of shutdown system reduced for 3.20e-04 per year and reaching from 9.5e-04 per year to 3.04e-08 per year.

Keywords: Tehran Research Reactor (TRR), Probabilistic Safety Analysis (PSA), Safety, Second Shutdown System (SSS), SAPHIRE code