Archive of SID

J. of Nucl Sci. and Tech.
81, 2017, 1-12

مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای
۸۱، ۱۳۹۶، ۱-۱۲

ارتقاء ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران با سیستم‌خاموشی‌دوم

احسان بوستانی، صمد خاکشورنیا*، ابراهیم عابدی
پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران ـ ایران

چکیده: مقوله‌ی ایمنی و دسته‌بندی مرتبط با آن، از مسائل مهم در همه‌ی زمینه‌های صنعت هسته‌ای، و به‌ویژه راکتورهای هسته‌ای است. از جمله مهم‌ترین جنبه‌ی ایمنی در راکتورهای هسته‌ای، وجود سیستم‌های خاموشی است که هر راکتور حداقل یکی از آنها را دارد. یکی از قابلیت‌هایی که می‌تواند ایمنی یک راکتور هسته‌ای را بالا ببرد اضافه کردن یک سیستم خاموشی دیگر به آن است. برای انجام هر تغییری مثل طراحی و جا نمایی سیستم خاموشی دوم در راکتور، توجه به ویژگی‌های خاص هر راکتور و معیارهای مبنای طراحی از جمله افزونگی، تنوع، استقلال، معیارهای تک نقص و حالت خود ایمن، ضروری است. یک سیستم خاموشی دوم برمبنای تزریق جاذب نوترون برای راکتور تحقیقاتی تهران با توجه به معیارها و الزامات مربوط به این راکتور طراحی شده است. طرح پیشنهاد شده اعتمادپذیری بالایی دارد که توانایی براورده کردن مهم‌ترین شرط طراحی، یعنی داشتن راکتیویته‌ی منفی مورد نیاز را داشته باشد. علاوه بر این بتواند راکتور را در بازه‌ی زمانی مشخص، با حاشیه‌ی ایمنی لازم و برای مدت زمان مورد نیاز زیر بحرانی کند. محاسبات و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد محاسباتی MCNPX انجام شده است. این طرح اندکی اثر منفی روی مشخصه-های مختلف قلب دارد که با بهینه‌سازی ساختار طراحی شده، آثار منفی ناشی از به کارگیری سیستم خاموشی دوم کمینه شده است.

کلیدواژه‌ها: ***راکتور تحقیقاتی تهران، سیستم خاموشی دوم، ایمنی، بهینه‌سازی، MCNPX***

Safety Enhancement of Tehran Research Reactor with a Second Shutdown System

E. Boustani, S. Khakshournia*, E. Abedi
Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Abstract: Safety and related categories are of importance in all fields of nuclear industry, especially as regards the nuclear reactors. One of the most important safety aspects in the nuclear reactors is the shutdown system, each reactor requiring at least one. One of capabilities that can improve the safety of a nuclear reactor is adding another shutdown system to it. For making any change as design and locating second shutdown system in the reactor, attention to special characteristics of any reactor and design basis criteria such as redundancy, diversity, separation, single failure criteria and fail-safe mode is necessary. A second shutdown system based on the injection of neutron absorber is designed with considering its standards and requirements for Tehran Research Reactor. The proposed design has a high reliability that fulfils the most important design requirement, which is having enough negative reactivity, has the ability to maintain the reactor in subcritical state in a determined period of time with the necessary safety margin and for needed time duration. Calculations and simulations have been done using MCNPX code. This design has some negative effects on different core characteristics, albeit minimized by the designed structure optimization.

Keywords: ***Tehran Research Reactor, Second Shutdown System, Safety, Optimization, MCNPX***

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۷/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۲/۲۷

*email: skhakshour@aeoi.org.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که در طراحی، ساخت و بهره-برداری از یک راکتور هسته‌ای مورد توجه است، سیستم خاموشی آن است. همه راکتورهای هسته‌ای یک سیستم خاموشی دارند، اما بنابر اسناد آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، الزام به داشتن یک سیستم خاموشی دوم علاوه بر سیستم خاموشی اول برای راکتورهای قدرت وجود دارد [۱]. برای آن دسته از راکتورهای تحقیقاتی که احتمال وقوع حادثه قابل پیش‌بینی باشد، رعایت همه‌ی اصول ایمنی در راکتور از جمله درنظر گرفتن سیستم خاموشی دوم برای محدود یا کم کردن آثار ناشی از رخداد حادثه توصیه شده است [۲، ۳]. پس از وقوع حادثه‌ی فوکوشیما، افزایش تمهیدات ایمنی در راکتورهای تحقیقاتی از جمله در نظر گرفتن سیستم خاموشی دومی که برمبنای تزریق جاذب نوترون عمل کند توصیه شده است [۴]. بسته به منظور راکتور اعم از قدرت یا تحقیقاتی و نوع آن، از روش‌های گوناگونی برای طراحی و جا نمایی سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود [۵-۷]. برای مثال در برخی راکتورها، مثل طراحی مدار فرمان در راکتور NRU در کانادا، بخشی از سیستم خاموشی دوم طراحی و نصب می‌شود [۸]. در برخی از راکتورها مثل راکتور FRM2 در آلمان، یک میله‌ی ایمنی به میله‌های کنترلی قلب اضافه، و از آن به عنوان سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود [۹]، در راکتورهای قدرت آب سبک، از روش تزریق اسیدبوریک به آب مدار اول در سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود [۱۰]، در راکتورهای آب‌سنگین که کندکننده و خنک‌کننده آب‌سنگین است، از تزریق جاذب نیترات گادولینیم به آب سنگین در سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود [۱۱]. در راکتورهای سریع که از فلز مایع به‌عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود، از آن‌جا که جاذبی مایع برای حل شدن در فلز مایع وجود ندارد، یا این که در صورت وجود و حل شدن جداسازی آن پرهزینه است، از فلزهای جامد دیگر مثل لیتیم یا تانتالیم به-عنوان جاذب در سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود [۱۲]. از طرف دیگر، در راکتورهای تحقیقاتی استخری خنک‌شونده با آب سبک که قلب آن درون یک محفظه‌ی آب سنگین به عنوان بازتابنده قرار دارد، از تخلیه‌ی آب سنگین بازتابنده در سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود [۱۳]. هم‌چنین در میان راکتورهای تحقیقاتی استخر باز که در آن همانند راکتور تحقیقاتی تهران خنک‌کننده و کندکننده آب سبک است، راکتور تحقیقاتی ۲۰ MW مصر دارای سیستم خاموشی دوم است که براساس تزریق محلول جاذب نیترات گادولینیم در قاب تعبیه شده در اطراف قلب عمل می‌کند [۱۴].

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور ۵ مگاواتی است که در مدت بیش از چهار دهه از آن در زمینه‌های متفاوت بهره‌برداری می‌شود و در یک منطقه مسکونی با تراکم جمعیت نسبتاً بالا واقع شده است. هم‌چنین از نظر طبقه‌بندی آژانس، براساس سطح خطر در رده‌ی ۲ از ۴ قرار می‌گیرد که به علت انجام آزمایش‌های خاص از جمله آزمایش سوخت در آن، سطح خطر منظور شده برای آن افزایش یافته است و در رده‌ی ۱ از طبقه‌بندی موجود قرار خواهد گرفت [۱۵]. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده، در نظر گرفتن یک سیستم خاموشی دوم برای راکتور تهران توصیه می‌شود. طراحی این سیستم باید با توجه به برخی محدودیت‌ها و ملاحظات در راکتورتهران انجام شود و یکی از این محدودیت‌ها اشغال فضای اطراف قلب راکتور تهران با کانال‌های تابش‌دهی و ستون حرارتی است که امکان جا نمایی هر سیستمی در اطراف آن را مشکل می‌سازد. از دیگر محدودیت‌ها، حجم کوچک قلب و در نتیجه فضای در دسترس ناچیز درون قلب برای هرگونه جا نمایی سیستم خاموشی دوم است. محدودیت دیگر، الزام به عدم انجام تغییرات عمده در اجزای قلب و ساختارهای اطراف آن به دلیل شرایط سنی و هزینه‌ای است. از طرفی هرگونه تغییر یا اصلاح باید به‌گونه‌ای باشد که تأثیر اندکی روی عملکرد نوترونی قلب، ایمنی و قابلیت‌های بهره‌برداری راکتور داشته باشد. از جمله این خصوصیات مهم که باید مورد توجه باشد حاشیه‌ی خاموشی، توزیع شار نوترون، مقدار شار محلی[1] در مکان‌هایی خاص، طول دوره سوخت‌گذاری و شرایط بهره-برداری است. در طراحی سیستم خاموشی دوم برای راکتور تهران، کوشش شده است که این الزامات و محدودیت‌ها درنظر گرفته شوند.

یک کار پژوهشی درباره طراحی سیستم خاموشی دوم در راکتور تهران بر روی قلب اول با ۱۹ مجموعه سوخت استاندارد و کنترلی به‌عنوان مبنای طراحی انجام گرفته است، که براساس آن افزودن تانک آب سنگین در اطراف قلب به‌عنوان بازتابنده‌ی نوترون در حالت کارکرد عادی، و تخلیه‌ی آن در مواقع اضطراری به‌عنوان طرح بهینه‌ی سیستم خاموشی دوم، پیشنهاد

www.SID.ir

Archive of SID

شده است. اما اجرای این طرح در راکتور تهران نیازمند انجام اصلاحات اساسی مثل بازطراحی قلب و ساختار کنونی راکتور است که پرهزینه و زمان‌بر به نظر می‌رسد [۱۶].

در این مقاله، ابتدا راکتور تحقیقاتی تهران به همراه سیستم خاموشی اول آن معرفی می‌شود. سپس با ارائه‌ی الزامات یک سیستم خاموشی دوم و نیز مواد مورد نیاز برای این راکتور، نوع سیستم خاموشی دوم انتخاب می‌شود. در بخش بعد، راستی-آزمایی محاسبات نوترونی با انجام آزمایش در راکتور ارائه شده است، سپس ارزش راکتیویته‌ی سیستم خاموشی دوم، اثر به کارگیری این سیستم روی قلب، و تغییرات راکتیویته‌ی قلب هم-زمان با تزریق جاذب در سیستم خاموشی دوم تعیین می‌شود. در بخش آخر نیز نتایج بهینه‌سازی سیستم خاموشی دوم ارائه شده است.

۲. معرفی راکتور تحقیقاتی تهران و سیستم خاموشی فعلی آن

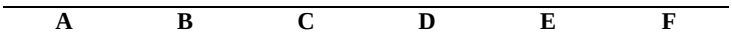
راکتور تحقیقاتی تهران در رده‌ی راکتورهای تحقیقاتی با قدرت متوسط، یک راکتور استخری با قلب باز، از نوع سوخت صفحه-ای، دارای کندکننده و خنک‌کننده‌ی آب سبک و بازتابنده‌ی گرافیت است. این راکتور یک شبکه‌ی پایه‌ی[۲] ۶×۹ در پایین قلب دارد که مجتمع‌های سوخت استاندارد[۳]، سوخت کنترلی[۴]، گرافیت[۵] و محل‌های تابش‌دهی[۶] روی آن قرار می‌گیرند. سیستم خاموشی اول آن از ۴ میله‌ی کنترل خاموشی آنی و یک میله‌ی کنترل تنظیمی تشکیل شده است. میله‌های خاموشی آنی از ترکیب کادمیم، ایندیم و نقره با نسبت وزنی ۵٪، ۱۵٪ و ۸۰٪ ساخته شده‌اند و میله‌ی کنترل تنظیمی از جنس فولاد ضدزنگ است. فعال‌سازی سیستم خاموشی اول به‌صورت دستی با استفاده از فرمان صادر شده از آشکارسازها و حسگرهای مختلف نصب شده در قسمت‌های گوناگون راکتور انجام می‌شود. سیستم ایمنی راکتور می‌تواند دستور خاموشی راکتور را از سامانه‌های پایش مختلف وابسته به آنها از جمله شار نوترون، دمای خنک‌کننده‌ی قلب، شارش جریان خنک‌کنندگی عبوری از قلب یا دیگر سامانه‌ها مثل سامانه‌ی پایش سوخت و سامانه‌ی پایش پرتوی محیط دریافت کند.

نمایی از چیدمان بالای قلب شماره‌ی ۷۰ راکتور تهران در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۷].

	Thermal Column					
۹	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	IR-BOX	GR-BOX
۸	SFE	RR	SFE	SFE	SFE	SFE
۷	SFE	SFE	SFE	SFE	SR2	SFE
٦	SFE	SR1	SFE	IR-BOX	SFE	SFE
٥	SFE	SFE	SFE	SFE	SR3	SFE
٤	SFE	SFE	SR4	SFE	SFE	SFE
٣	IR-BOX	SFE	SFE	SFE	SFE	IR-BOX
٢	GR-BOX	IR-BOX	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX
١	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. قلب تعادلی شماره‌ی ۷۰ راکتور تحقیقاتی تهران.

۳. سیستم خاموشی دوم

۱.۳ الزامات

سیستم خاموشی دوم در راکتور تهران به عنوان یک سیستم اعتمادپذیر و مستقل باید الزامات زیر را داشته باشد:

۱. این سیستم باید قادر به زیربحرانی کردن راکتور در بازه‌ی زمانی قابل‌قبول، با حاشیه‌ی ایمنی کافی و توانایی نگه‌داری راکتور در آن حالت را برای مدت زمان مشخص داشته باشد. بازه‌ی زمانی عملکرد این سیستم از مرتبه‌ی چند ثانیه است [۱۳، ۱۸] و کمینه‌ی حاشیه‌ی ایمنی مورد نظر برای این سیستم باید ۱۰۰۰ pcm باشد [۱۴، ۱۹]،

۲. اجزای این سیستم می‌باید در مکان‌هایی متفاوت از سیستم خاموشی اول قرار گیرد و هم‌چنین از سخت‌افزار، نرم‌افزار و روش عملکردی متفاوت از آن برای رعایت اصولی از جمله جدایی فیزیکی[۷]، تنوع[۸] و چندکارگی[۹] به منظور جلوگیری از بروز خرابی‌ها با منشأ مشترک[۱۰] استفاده شود.

۳. این سیستم نباید تأثیر منفی چندانی روی ویژگی‌های نوترونی قلب از جمله توزیع شار درون قلب یا شار در محل‌های
تابش‌دهی داشته باشد،

۴. این سیستم نباید تأثیر منفی قابل توجه روی ویژگی‌های بهره‌برداری از جمله طول دوره‌ی سوخت‌گذاری یا محل‌های در دسترس برای نمونه‌گذاری داشته باشد،

۵. جا نمایی سیستم باید به راحتی قابل اجرا باشد، تعمیر و نگه‌داری آن کم‌هزینه باشد و نباید سبب تغییرات عمده در وضعیت قلب و یا ساختارهای آن شود.

۲.۳ مواد قابل استفاده در سیستم خاموشی دوم

از دو گونه مواد در سیستم خاموشی دوم استفاده می‌شود؛ یکی مواد با سطح مقطع جذب نوترون کم به عنوان ماده‌ی بی‌اثر، بازتابنده یا کندکننده برای حالت کار عادی راکتور و دیگری مواد جاذب برای زمان فعال شدن این سیستم. مواد استفاده شده در حالت کار عادی راکتور باید پرتوزا نشوند و آثار منفی ناشی از کارگذاری سیستم خاموشی دوم را کاهش داده یا خنثی کند. برای مثال در راکتور استخر باز استرالیا[۱۱] [۱۳]، از آب سنگین داخل تانک در اطراف قلب راکتور به‌عنوان بازتابنده استفاده می‌کنند که علاوه بر خاصیت بازتابندگی، سبب نرم شدن طیف نوترون
می‌شود و در زمان مورد نیاز با تخلیه‌ی آن به عنوان سیستم خاموشی دوم عمل می‌کند و راکتور را خاموش خواهد کرد.

ماده‌ی جاذب استفاده شده باید سطح مقطع جذب نوترون بالایی داشته باشد، توانایی مقاومت در برابر تابش و دمای بالا را داشته باشد، محلول آن از لحاظ شیمیایی پایدار باشد و با ساختارهای راکتور واکنش شیمیایی شدید انجام ندهد. چند ماده که می‌توان از آنها به‌عنوان جاذب یا ماده‌ی بی‌اثر در سیستم خاموشی دوم راکتور استفاده کرد در جدول ۱ ارائه شده است.

۳.۳ سیستم خاموشی دوم پیشنهادی

چندین طرح برای استفاده به عنوان سیستم خاموشی دوم بررسی شده‌اند. از جمله طرح‌هایی که شامل تزریق جاذب نیستند می‌توان به گزینه‌های زیر اشاره کرد:

۱. استفاده از قطعه‌ای جاذب در بالای قلب که هنگام حادثه، با سقوط به درون قلب سبب خاموشی راکتور شود؛
مهم‌ترین ایراد این طرح شباهت سازوکار عمل آن با سیستم خاموشی اول راکتور است.

۲. استفاده از یک شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی چند تکه زیر قلب که هنگام بروز حادثه، با باز شدن سبب خاموشی راکتور شود؛
فضای کم در دسترس در اطراف قلب برای اجرای این طرح، نیاز به اِعمال تغییرات زیاد در ساختار کنونی راکتور، و
هزینه‌ی زیاد مربوط به اجرا، تعمیر و نگه‌داری از ایرادات این طرح است.

۳. استفاده از یک ساز و کار برای خارج کردن چند مجموعه سوخت از داخل قلب هنگام بروز حادثه است؛
شباهت چگونگی عمل آن به سیستم خاموشی اول راکتور، از جمله ایرادات این طرح است.

۴. استفاده از آب سنگین؛
نیاز به فضای زیاد اطراف قلب، سختی نگه‌داری و قیمت آب سنگین از جمله عیب‌های این طرح است.

جدول ۱. مواد قابل استفاده به عنوان جاذب یا ماده‌ی بی‌اثر

ماده	حالت فیزیکی	چگالی (g/cm^3)	کاربرد	مرجع
نیتروژن	گاز	۰٫۰۰۱۲۵۱	ماده‌ی بی‌اثر	[۲۰]

www.SID.ir

Archive of SID

هلیم	گاز	۰٫۰۰۱۵۵۰	ماده‌ی بی‌اثر	[۱۱]
آب سبک	مایع	۱	کندکننده	[۲۱، ۲۲]
آب سنگین	مایع	۱٫۱۱	کندکننده	[۱۳]
اسید بوریک	محلول	۱٫۰۳	جاذب	[۲۳]
نیترات گادولینیم	محلول	۱٫۲۵	جاذب	[۱۱، ۲۰]

از جمله طرح های شامل تزریق جاذب برای سیستم خاموشی دوم می‌توان به گزینه‌های زیر اشاره کرد:

۱. استفاده از دو یا چند محل تابش‌دهی برای تزریق جاذب؛
نداشتن راکتیویته منفی کافی برای خاموش کردن راکتور یکی از عیب‌های این طرح است.

۲. استفاده از ردیف‌های ۱، ۲ و ۹ قلب که شامل گرافیت و محل تابش‌دهی هستند برای تزریق جاذب؛
اشغال فضای زیادی از قلب از جمله عیب‌های این طرح است.

۳. تغییر شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی قلب و تعبیه‌ی محفظه‌هایی به صورت عمودی، افقی یا صلیبی بین ردیف‌ها یا ستون‌های وسط قلب برای تزریق جاذب نوترون؛
نیاز به دستکاری و تغییر شبکه‌ی نگه‌دارنده‌ی قلب و هزینه‌ی تعمیر و نگه‌داری زیاد آن از ایرادهای این طرح به شمار می‌آید.

۴. برش دادن ۴ عدد از گرافیت‌های ردیف ۲ و ۹ و جا نمایی دو محفظه‌ی توخالی در این ردیف‌ها برای تزریق محلول جاذب نوترون.

به جز مورد آخری، دیگر طرح‌های اشاره شده همه‌ی الزامات و محدودیت‌های بیان شده برای سیستم خاموشی دوم را ندارند، بنابراین این طرح که در شکل ۲ نشان داده شده است به‌عنوان سیستم خاموشی دوم انتخاب شد.

سیستم خاموشی دوم در حالت عادی از گاز نیتروژن پر می‌شود و در زمان فعال شدن آن، محلول جاذب نوترون به داخل آن تزریق می‌شود. از محلول اسید بوریک به‌عنوان جاذب نوترون استفاده می‌شود که در حالت عادی به‌صورت پودر بلورین است و با نسبت ۵٪ وزنی در دمای ۲۰°C در آب حل، و محلول جاذب نوترون تولید می‌شود [۲۴]. مشخصات مربوط به این سیستم خاموشی دوم در جدول ۲ ارائه شده است.

	Thermal Column					
۹	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX
		Second Shutdown Box 1				
۸	SFE	RR	SFE	SFE	SFE	SFE
۷	SFE	SFE	SFE	SFE	SR2	SFE
٦	SFE	SR1	SFE	IR-BOX	SFE	SFE
٥	SFE	SFE	SFE	SFE	SR3	SFE
٤	SFE	SFE	SR4	SFE	SFE	SFE
٣	IR-BOX	SFE	SFE	SFE	SFE	IR-BOX
٢	GR-BOX	Second Shutdown Box 2				GR-BOX
		GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	
١	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX

www.SID.ir

Archive of SID

A B C D E F

شکل ۲. قلب راکتور تحقیقاتی تهران پس از جا نمایی سیستم خاموشی دوم.

جدول ۲. مشخصات سیستم خاموشی دوم

مؤلفه	مقدار
جنس دیواره	AL-۶۰۶۱
ضخامت دیواره (mm)	۳
ارتفاع محفظه (mm)	۷۰۳
طول محفظه (mm)	۷۷۰
عرض محفظه (mm)	۳۰
جاذب	محلول اسید بوریک

۴. نتایج و بحث

۱.۴ راستی‌آزمایی محاسبات با نتایج تجربی

برای اطمینان از درست بودن شبیه‌سازی و قابل اعتماد بودن نتایج به‌دست آمده از کد MCNPX، پس از شبیه‌سازی قلب شماره‌ی ۷۰ و منظور کردن میزان مصرف سوخت هر کدام از مجموعه-های سوخت استاندارد و کنترلی، راکتیویته اضافی مربوط به نقاط بحرانی تجربی راکتور، یعنی نقاطی با راکتیویته‌ی صفر، برای چندین نقطه در زمان‌های مختلف، که در دفتر ثبت راکتور[۱۲] موجود است [۱۷] به‌دست آمده، و در جدول ۳ ارائه شده است.

بخشی از خطای موجود در جدول ۳ می‌تواند ناشی از خطا در محاسبه‌ی میزان مصرف سوخت، میزان عناصر رادیو اکتیو موجود در قلب، تأثیر نمونه‌های موجود به منظور تابش‌دهی در قلب و متفاوت بودن شرایط واقعی قلب از شرایط شبیه‌سازی در دمای ۳۰۰K باشد. با درنظر گرفتن عوامل ایجاد خطا و این‌که اضافه راکتیویته‌ی به‌دست آمده در بدترین شرایط، که حالت ۸ است، کم‌تر از کسر نوترون تأخیری، و برابر ۷۸۰pcm است، جواب‌های به‌دست آمده در این حالت مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارند و می‌توان به درستی شبیه‌سازی و روش کار اطمینان کرد.

۲.۴ ارزش راکتیویته‌ی سیستم خاموشی دوم

نتایج محاسبات برای راکتیویته قلب با و بدون سیستم خاموشی دوم پیشنهاد شده در جدول ۴ ارائه شده است. در این محاسبات، همه‌ی میله‌های کنترل بیرون درنظر گرفته شده‌اند.

همان‌گونه که در الزامات مربوط به سیستم خاموشی دوم بیان شد، این سیستم باید توانایی زیربحرانی کردن راکتور با حاشیه‌ی خاموشی ۱۰۰۰ pcm را داشته باشد. از آن‌جا که بیش‌ترین میزان راکتیویته‌ی اضافی قلب‌های تعادلی راکتور تهران در حالت کار کم‌تر از ۱۵۰۰pcm است و با توجه به توانایی اِعمال راکتیویته‌ی ۲۸۰۰pcm از سیستم خاموشی دوم، همان‌گونه که در جدول ۴ قابل مشاهده است، این سیستم شرط مربوط به حاشیه‌ی خاموشی را دارد.

۳.۴ اثر کارگذاری سیستم خاموشی دوم روی کارکرد قلب

از آن‌جا که این سیستم کاملاً مستقل و متفاوت از سیستم خاموشی اول است، یعنی این‌که از اجزای متفاوت از سیستم خاموشی اول تشکیل شده و شیوه‌ی کارکردی متفاوتی دارد، کارگذاری این سیستم درون قلب، هیچ اثر منفی روی کارکرد سیستم خاموشی اول نخواهد داشت.

توزیع شار نوترون در محل‌های تابش‌دهی قبل و پس از جا نمایی سیستم خاموشی دوم در شکل ۳ نشان داده شده است. یادآوری می‌شود که محاسبات انجام شده دارای خطای نسبی کم‌تر از ۲٪ است.

با توجه به دور بودن محل این کارگذاری از مرکز قلب نسبت به مکان مربوط به تابش‌دهی نمونه‌ها، اثر منفی ناشی از این جا نمایی در شار نوترون در دسترس در محل‌های تابش‌دهی، آن‌گونه که در شکل ۳ برای ۳ محل تابش‌دهی نمایش داده شده است، قابل توجه نیست.

۴.۴ تغییرات راکتیویته‌ی قلب هم‌زمان با تزریق جاذب

تغییرات مربوط به راکتیویته‌ی قلب راکتور، که متناظر با ارزش کل سیستم خاموشی دوم است، برای هر بازه‌ی زمانی مطابق با تزریق اسید بوریک با نرخ تزریق ۱ l/s به داخل محفظه‌های سیستم خاموشی دوم به‌صورت تابعی از زمان، محاسبه، و در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج گزارش شده دارای بیشینه خطای نسبی ۵۰pcm است.

www.SID.ir

Archive of SID

۵. بهینه‌سازی سیستم خاموشی دوم

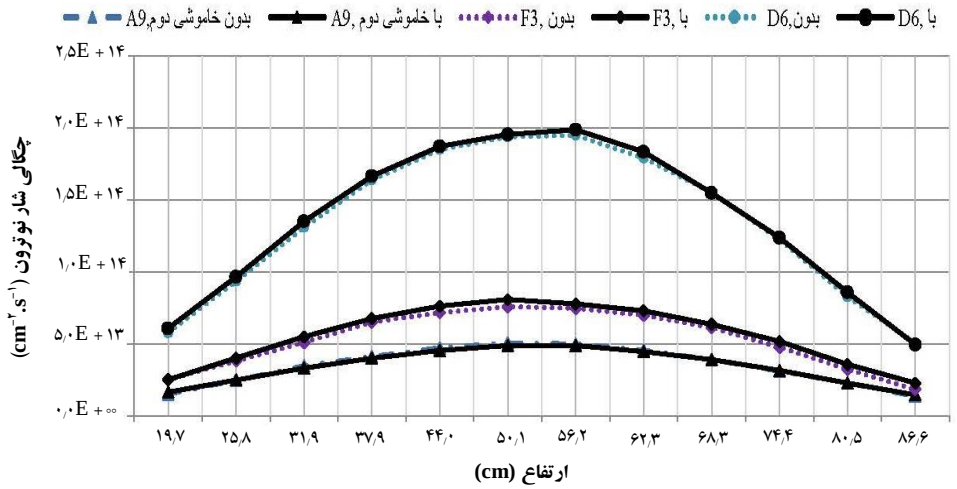
در این بخش برای بهینه‌سازی طراحی سیستم خاموشی پیشنهادی، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد آن با در نظر گرفتن قلب تعادلی شماره‌ی ۷۰ بررسی شده است.

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی برای نقاط بحرانی قلب ۷۰

وضعیت	تاریخ	ساعت	درصد خروج میله‌ها در وضعیت بحرانی قلب	راکتیویته (pcm)
۱	۱۳۹۳/۰۶/۲۶	۱۷:۱۰	SRs = ۵۷ ، RR = ۴۵٫۹	۲۵۰ ± ۵۵
۲	۱۳۹۳/۰۶/۲۷	۱۲:۰۵	SR1= ۰, SR2=۷۱٫۵, SR3=۱۰۰, SR4=۷۱٫۵, RR=۴۵	۴۵۹ ± ۵۰
۳	۱۳۹۳/۰۶/۲۷	۱۵:۳۴	SR1=۴۸, SR2=۵۵, SR3=۵۱, SR4=۸۸, RR=۴۵٫۹	۴۵۹ ± ۵۰
۴	۱۳۹۳/۰۶/۲۷	۱۸:۲۲	SRs = ۵۸٫۷ ، RR = ۵۷٫۲	۳۱۷ ± ۵۷
۵	۱۳۹۳/۰۶/۲۷	۲۱:۱۴	SRs = ۵۹ ، RR = ۲۷	۴۳۸ ± ۵۳
۶	۱۳۹۳/۰۶/۲۹	۰۸:۰۰	SRs = ۷۸ ، RR = ۶۰	۶۰۶ ± ۵۶
۷	۱۳۹۳/۰۶/۲۹	۱۷:۱۰	SRs = ۷۸ ، RR = ۷۰٫۵	۲۵۵ ± ۵۲
۸	۱۳۹۳/۰۶/۳۰	۰۸:۰۰	SRs = ۸۰ ، RR = ۳۵	۷۵۶ ± ۵۹
۹	۱۳۹۳/۰۶/۳۱	۰۸:۰۰	SRs = ۷۹ ، RR = ۵۹	۷۱۶ ± ۵۴

جدول ۴. راکتیویته‌ی قلب ۷۰ برای حالت‌های مختلف

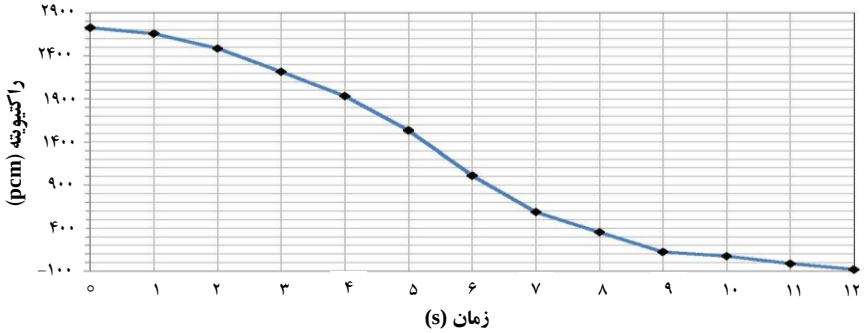
مؤلفه	راکتیویته (pcm)
قلب تعادلی، قبل از جا نمایی سیستم خاموش دوم	۳۱۸۸ ± ۱۱۳
قلب تعادلی، پس از جا نمایی سیستم خاموش دوم، سیستم حاوی نیتروژن است	۲۷۲۷ ± ۴۸
قلب تعادلی، پس از جا نمایی سیستم خاموش دوم، سیستم از اسید بوریک غنی شده پر شده است	−۷۹ ± ۴۳



شکل ۳. تأثیر جا نمایی سیستم خاموشی دوم روی شار نوترون در محل‌های تابش‌دهی.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. تغییرات راکتیویته با زمان.

۱.۵ ضخامت دیواره‌ی آلومینیمی محفظه‌ی سیستم خاموشی دوم

تأثیر ضخامت دیواره آلومینیمی محفظه بر ارزش کل سیستم خاموشی دوم هنگامی‌که این سیستم حاوی جاذب یا نیتروژن است به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. در همه‌ی محاسبات انجام شده برای این بخش، نتایج با بیشینه خطای نسبی ۵۰pcm گزارش شده است.

در این محاسبات از اسید بوریک با غنای ۹۹٪ B^{10}، غلظت ۵۰ g/l اسید بوریک در آب و پهنای جاذب ۳cm استفاده شده است.

همان‌گونه که از شکل ۵ دیده می‌شود اضافه شدن ضخامت دیواره‌های محفظه‌ی جاذب، سبب کاهش اثر سیستم خاموشی دوم هنگامی‌که پر از جاذب است خواهد شد.

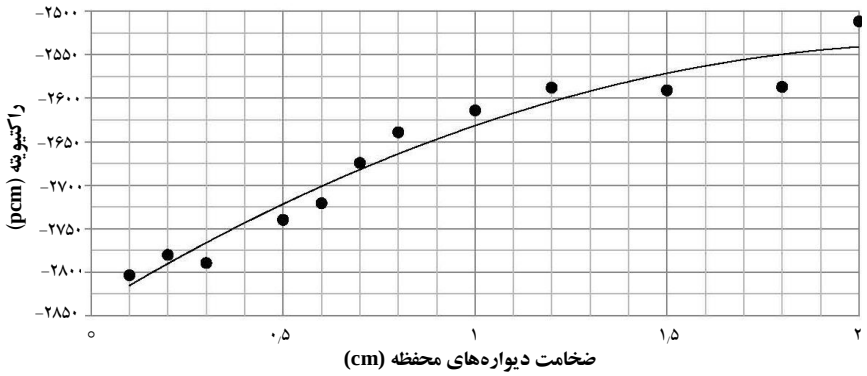
همان‌گونه که از شکل ۶ دیده می‌شود، افزایش ضخامت دیواره‌های محفظه‌ی جاذب، سبب اثر منفی روی راکتیویته‌ی اضافی قلب می‌شود. از این‌رو با توجه به این اثر منفی که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند و با درنظر گرفتن امکان ساخت و لزوم داشتن استحکام لازم، ضخامت بهینه برای دیواره‌های محفظه‌ی جاذب ۳mm در نظر گرفته خواهد شد.

۲.۵ پهنای کل سیستم خاموشی دوم

تأثیر تغییر پهنای کل محفظه‌ی حاوی جاذب سیستم خاموشی دوم به دو صورت بررسی می‌شود، ابتدا اثر منفی ناشی از کارگذاری آن درون قلب هنگامی‌که حاوی نیتروژن است و سپس راکتیویته‌ی منفی جاذب قابل تزریق به سیستم خاموشی دوم بررسی می‌شود.

در این محاسبات از اسید بوریک با غنای ۹۹٪، B^{10}، غلظت ۵۰g/l اسید بوریک در آب و ضخامت دیواره‌ی ۳ mm استفاده شده است.

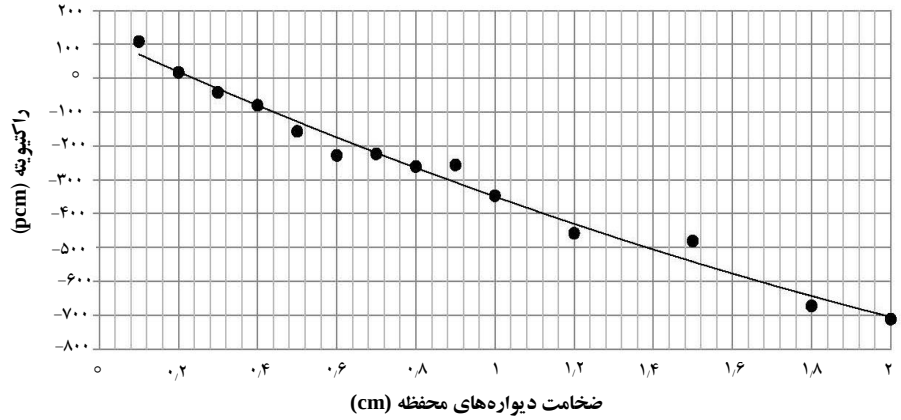
همان‌گونه که انتظار می‌رود و از شکل ۷ دیده می‌شود، هرچه پهنای محفظه‌ی سیستم خاموشی دوم بیش‌تر باشد، از آن‌جا که محفظه‌ها در حالت عادی کارکرد قلب، از نیتروژن پر می‌شوند، ناحیه‌ی فرار نوترون بیش‌تری در ردیف‌های ۲ و ۹ قلب ایجاد می‌شود که سبب اثر منفی بیش‌تری روی راکتیویته‌ی قلب خواهد شد.



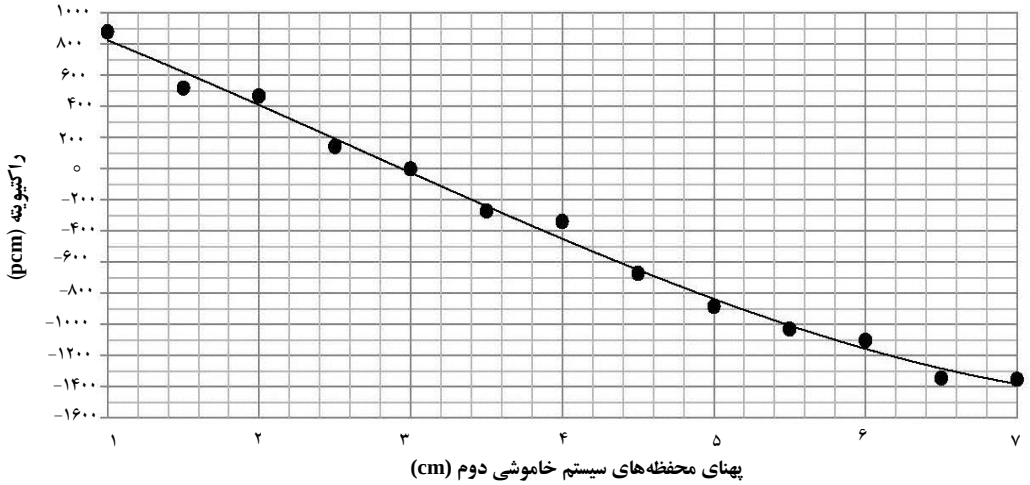
شکل ۵. اثر ضخامت دیواره‌های محفظه‌ی جاذب روی راکتیویته با وجود جاذب.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶. اثر ضخامت دیواره‌های محفظه‌ی جاذب روی راکتیویته بدون وجود جاذب.



شکل ۷. اثر پهنای سیستم خاموشی دوم حاوی نیتروژن روی راکتیویته قلب.

همان‌گونه که از شکل ۸ دیده می‌شود، با افزایش پهنای سیستم خاموشی ۲ تا ۳ cm، کارایی سیستم با شیب تند افزایش می‌یابد، از طرفی با افزایش این پهنا تا ۶cm افزایش ناچیزی در کارایی این سیستم اتفاق می‌افتد در حالی که با افزایش پهنا به بیش‌تر از ۶ cm اثر مثبت دیده نخواهد شد، چرا که مقدار جاذب نوترون سیستم خاموشی دوم برای جذب نوترون‌های موجود در آن ناحیه از قلب کافی است و نوترون بیش‌تری وجود ندارد که با اضافه شدن به میزان جاذب، امکان جذب آن وجود داشته باشد. از طرفی اضافه کردن به پهنای سیستم خاموش همان‌طورکه از شکل ۷ قابل مشاهده است، سبب کاهش راکتیویته‌ی اضافی قلب هنگام کارکرد عادی آن می‌شود. با درنظر گرفتن روندهای دیده شده در شکل‌های ۷ و ۸، پهنای بهینه‌ی ۳ cm برای سیستم خاموشی دوم انتخاب می‌شود.

۳.۵ جاذب استفاده شده در سیستم خاموشی دوم، شامل غلظت جاذب حل شده و میزان غنای جاذب

تأثیر غلظت جاذب استفاده شده برای تزریق و هم‌چنین غنای این جاذب بر ارزش سیستم خاموشی دوم بررسی شده است.

در این محاسبات از پهنای جاذب ۳ cm و ضخامت دیواره‌های محفظه‌ی تزریق جاذب ۳ mm استفاده شده است.

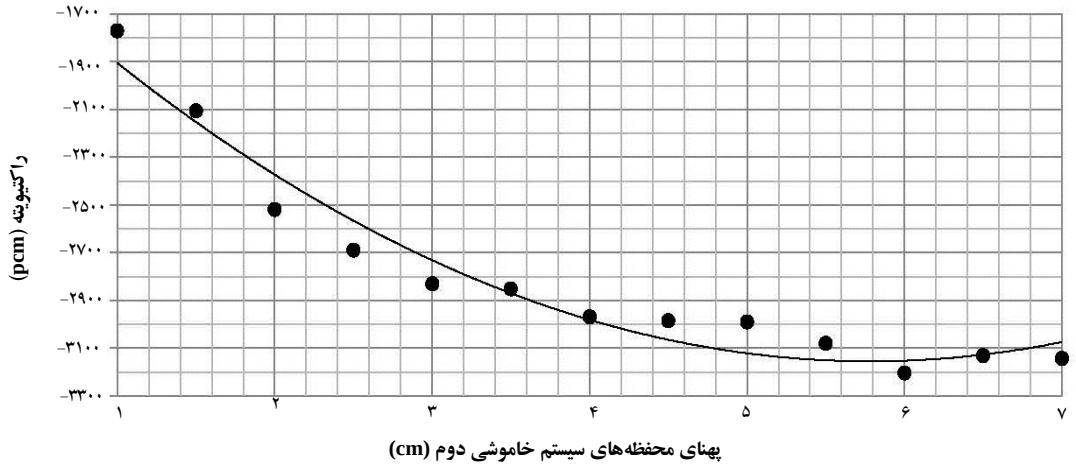
برای بررسی تأثیر غلظت جاذب روی عملکرد سیستم، از اسید بوریک ۹۹٪ غنی شده با B^{10} در محاسبات استفاده شده است که میزان غلظت آن در آب از ۵ g/l در لیتر تا حد اشباع آن که ۵۰g/l است تغییر داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۹ دیده می‌شود اضافه کردن میزان جاذب در حجم معینی از آب، در ابتدا اثر شدیدی دارد که با شیب ملایم ادامه پیدا می‌کند، ولی در انتها، این اضافه کردن اثر چندانی روی راکتیویته‌ی اعمال شده نخواهد داشت. همانند

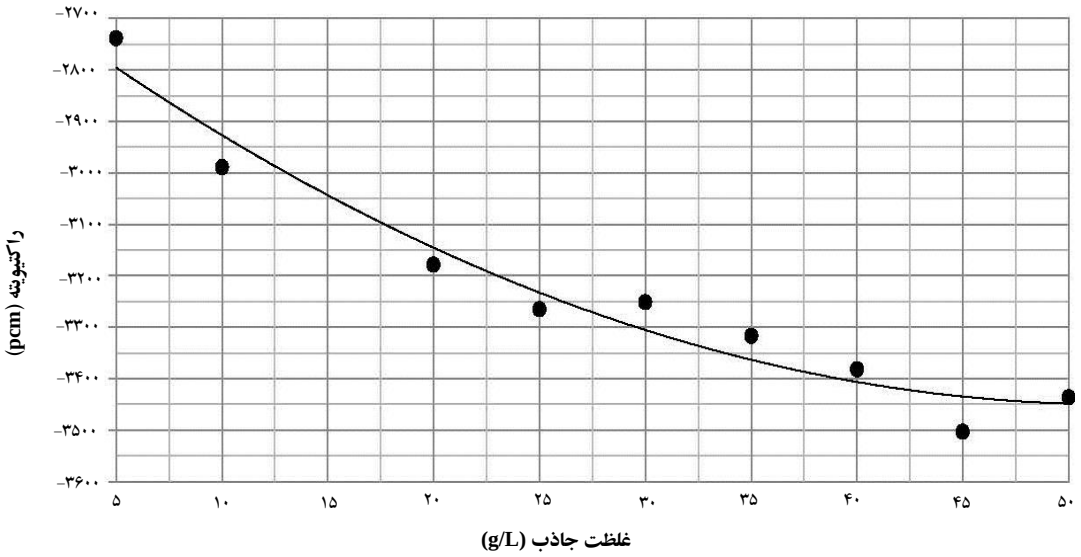
www.SID.ir

Archive of SID

توضیح مربوط به پهنای سیستم خاموشی دوم، میزان نوترون موجود در ناحیه‌ی نزدیک به سیستم خاموشی دوم به اندازه‌ای نیست که جاذب اضافه شده به محلول برای جذب آن استفاده شود. برای سیستم خاموشی دوم، از اسید بوریک با غلظت ۴۵ g/l در آب، پهنای جاذب ۳ cm و ضخامت دیواره‌های محفظه جاذب ۳ mm استفاده شده است. همان‌گونه که از شکل ۱۰ دیده می‌شود، غنی‌سازی سبب افزایش کارایی سیستم خاموشی دوم خواهد شد. البته این افزایش کارایی مستلزم هزینه‌ی اضافی بابت غنی‌سازی جاذب است، به‌طوری‌که برای داشتن ۵۰۰pcm راکیتویته‌ی منفی بیش‌تر، هزینه‌ی تهیه‌ی جاذب غنی شده بیش از ۵۰ برابر جاذب معمولی است. به‌دلیل اهمیت زیاد کارایی سیستم خاموشی دوم در افزایش ایمنی، غنای بهینه‌ی ۹۹٪ انتخاب می‌شود.



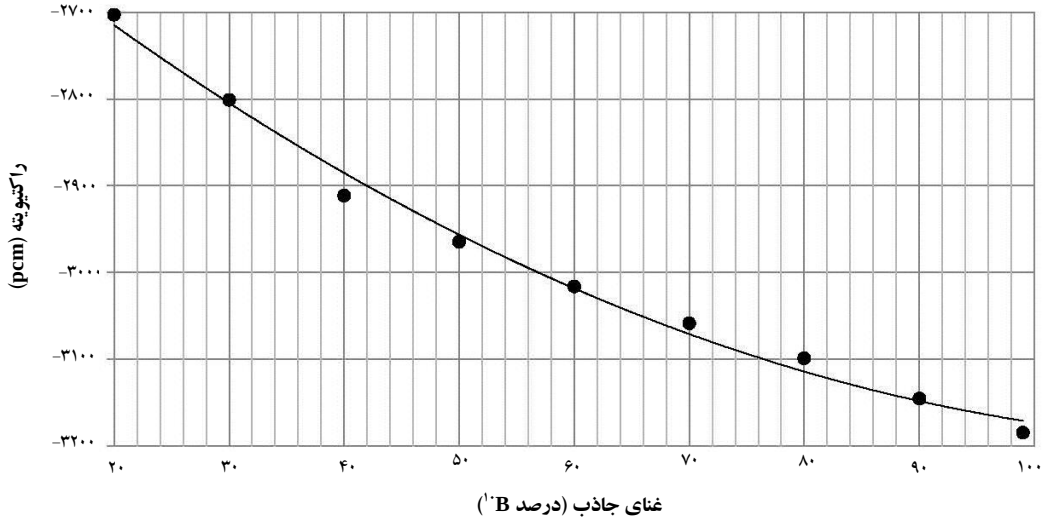
شکل ۸. اثر پهنای سیستم خاموشی دوم حاوی جاذب روی راکتیویته.



شکل ۹. اثر غلظت اسید بوریک در آب روی راکتیویته‌ی قلب.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰. اثر غنی‌سازی بر عملکرد سیستم خاموشی دوم.

۶. نتیجه‌گیری

به دلیل شرایط خاص راکتور تهران و هم‌چنین توصیه‌ی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به در نظر داشتن گزینه‌های ایمنی بیش‌تر در راکتورها، وجود سیستم خاموشی دوم برای این راکتور توصیه می‌شود. با طراحی و جا نمایی سیستم خاموشی دوم پیشنهادی درون قلب راکتور که با تزریق محلول جاذب نوترون عمل می‌کند و کاملاً متفاوت و مستقل از سیستم خاموشی اول است، سطح ایمنی آن افزایش خواهد یافت بدون آن‌که تغییر عمده‌ای در ساختار قلب و شبکه‌ی نگه‌دارنده آن داده شود. این سیستم قادر است راکتور را با حاشیه‌ی ایمنی مورد نظر خاموش کند. بهینه‌سازی سیستم خاموشی دوم با انجام تحلیل حساسیت و بررسی تأثیر هر کدام از پارامترهای مرتبط روی عملکرد کلی قلب راکتور انجام شده است. ضخامت بهینه برای دیواره‌ی محفظه‌ها ۳ mm، پهنای بهینه‌ی محفظه‌های تزریق جاذب ۳ cm، میزان غنای بهینه ۹۹٪ و غلظت بهینه‌ی پودر جاذب برای تهیه محلول جاذب نوترون ۴۵ g/l درنظرگرفته شده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Local Flux
2. Grid plate
3. SFE: Standard Fuel Element
4. CFE: Control Fuel Element
5. GR-BOX, Graphite Box
6. IR-BOX, Irradiation Box
7. Separation
8. Diversity
9. Redundancy
10. Common Cause Failures
11. Open Pool Australian Light Water Reactor
12. Logbook

مراجع

[1] Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirement NO. SSR-2/1, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2012) 38.

[2] Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-1.12, Interantional Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2005) 24.

[3] Use of a Graded Approach in the Application of the Safety Requirements for Research Reactors, IAEA Safety Standard, Specific Safety Guide No. SSG-22, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2012) 30.

www.SID.ir

Archive of SID

[4] Safety Reassessment for Research Reactors in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Safety Report Series No. 80, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2014) 13.

[5] M.V.I. Fukami, A. Santecchia, CAREM Project: Innovative Small PWR, *Prog. in Nucl. En.* **37(1)** (2000) 265-270.

[6] E. Uspuras, S. Rimkevicius, A. Kaliatka, Ignalina Nuclear Power Plant Safety Issues, The 25th International Symposium on Automation in Construction, Technika, Vilnius (2008) 33-38.

[7] Z. Wu, D. Lin, D. Zhong, The Design Features of the HTR-10, *Nucl. Eng. Des.* **218(1)** (2002) 25-32.

[8] C.M. Tseng, Second Trip System for NRU Research Reactor, *Nucl. Eng. Des.* **152(1)** (1994) 175-181.

[9] K. Böning, J. Blombach, Design and Safety Features of the Planned Compact Core Research Reactor FRM-II (1995).

[10] J.J. Duderstadt, L.J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis, John Wiely & Sons, Inc., Ann Arbor, Michigan (1976) pp. 210, 539, 554.

[11] M.K. Sapara, S. Kundu, L.R. Mohan, Development of High Pressure Conductivity Probe (HPCP) for Secondary Shut down System (SDS-2) of 500 MWe PHWR, BARC report, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India (2003).

[12] S. Vanmaercke, G. Van den Eynde, E. Tijskens, Y. Bartosiewicz, Design of a Complementary Scram System for Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors, *Nucl. Eng. Des.* **243** (2012) 87-94.

[13] S. Kim, The OPAL (Open Pool Australian Light-Water) Reactor in Australia, *Nucl. Eng. Tech.* **38 (5)** (2006) 443.

[14] M.A. Gaheen, Safety Aspects of Research Reactor Core Modification for Fission Molybdenum-99 Production, RERTR 2010-32th International Meeting on Reduced Enrichment for Resarch Reactors, Lisbon, Portugal (2010).

[15] Safety of New and Existing Research Reactor Facilities in Relation to External Events, Safety report series No. 41, Interantional Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2005) 11-12.

[16] H.R. Jalili, A.H. Fadaei, M. Garib, Study on Secondary Shutdown Systems in Tehran Research Reactor, *Nucl. Eng. Des.* **291** (2015) 224-235.

[17] Logbook of Tehran Research Reactor, No. 24, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran (1999).

[18] J.V. Lolich, Advanced Nuclear Research Reactor, Office of Scientific and Technical Information, United States Department of Energy, Argentina (2004).

[19] Replacement research reactor project, chapter 5c, Safety Analysis Report, Austalia (2014) 4.

[20] H.M. Hussein, E. Amin, A.M. Sakr, Effect of Core Configurations on Burn-Up Calculations For MTR Type Reactors, Proceedings of the 8th Conference on Nuclear and Particle Physics, Hurghada, Egypt (2011).

[21] J.R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, Addision-Wesely publishing company, Polytechnic Institute of New York, USA (1975) 276-290.

[22] S. Glasstone, A. Sesonske, Nuclear Reactor Engineering, Vol. 4 (1994), New York: Chapman & Hall Inc.

[23] G.d.K. Ausschusses, Shutdown system for light water reactor, Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany (1984).

[24] K. Crapse, E. Kyser, Literature Review of Boric Acid Solubility Data, Savaneh River National Laboratory, USA (2011).

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir