



بهینه‌سازی سامانه خاموشی دوم راکتور تحقیقاتی تهران

بوستانی، احسان^{(۱)*}، خاکشورنیا، صمد^(۱)، آهنگری شاهدهی، روح‌الله^(۱) و حسن زاده، مصطفی^(۱)

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

چکیده:

یکی از قابلیت‌هایی که می‌تواند ایمنی یک راکتور هسته‌ای را بالا ببرد، اضافه کردن یک سامانه خاموشی دیگر به آن است. برای انجام هر تغییری مثل طراحی و جانمایی سامانه خاموشی دوم در راکتور، توجه به ویژگی‌های خاص هر راکتور و معیارهای مبنای طراحی ضروری است. یک سامانه خاموشی دوم برای راکتور تحقیقاتی تهران طراحی شده است که دارای اعتمادپذیری بالا بوده و قادر به زیربحرانی کردن راکتور در بازه زمانی مشخص و با حاشیه ایمنی مورد نیاز است. شبیه‌سازی‌ها جهت بهینه کردن مشخصه‌های مختلف سامانه پیشنهادی با استفاده از کد احتمالاتی MCNPX انجام و مقادیر بهینه برای ضخامت دیواره، پهنای محفظه و غلظت و غنای جاذب تعیین شده است.

کلمات کلیدی: راکتور تحقیقاتی تهران، سامانه خاموشی دوم، ایمنی، بهینه‌سازی، MCNPX

Optimization of Tehran research reactor second shutdown system

Boustani, Ehsan^{1*}; Khakshournia, Samad¹; Rouhollah, Ahangari shahdehi^{1*} and Hassanzadeh, Mostafa¹

¹ AEOI, Nuclear Science and Technology Research Institute, Reactor and nuclear safety faculty

Abstract:

One of capabilities which could enhance a reactor safety is adding another shutdown system to it. For doing any change such as design and construction a second shutdown system in a reactor, pay attention to specific characteristics of the reactor and to the design criteria is necessary. One second shutdown system is designed for Tehran Research Reactor which have high reliability and capability for transferring it to subcritical condition in determined time with necessary safety margin. Simulations for optimization of different proposed system characteristics has been done using MCNPX probabilistic code and the optimized values for wall thickness, container width, and concentration and enrichment of absorber are determined.

Keywords: Tehran Research Reactor, Second shutdown system, safety, optimization, MCNPX



مقدمه:

یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی که در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از یک راکتور هسته‌ای مورد توجه است، سامانه خاموشی آن است. بسته به مشخصات راکتور، از روش‌های گوناگونی برای طراحی و جانمایی سامانه خاموشی دوم استفاده می‌شود [۱-۵]. راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور ۵ مگاواتی است که بیش از چهار دهه است از آن در زمینه‌های متفاوت بهره‌برداری می‌شود و در یک منطقه مسکونی با تراکم جمعیتی بالا واقع شده است، پس طراحی این سامانه باید با توجه به برخی محدودیت‌ها و ملاحظات در راکتور تهران انجام شود. یکی از این محدودیت‌ها، اشغال فضای اطراف قلب راکتور تهران با کانال‌های پرتودهی و ستون حرارتی است که امکان جانمایی هر سامانه‌ای در اطراف آن را مشکل می‌سازد. از دیگر محدودیت‌ها حجم کوچک قلب و در نتیجه فضای در دسترس ناچیز درون قلب برای هرگونه جانمایی سامانه خاموشی دوم است. قابل گفتن است که انجام تغییرات عمده در اجزای قلب راکتور و ساختارهای اطراف با توجه به گذشت بیش از ۵۰ سال از کارکرد این راکتور مستلزم هزینه‌های زیادی می‌باشد که خود یکی دیگر از محدودیت‌های پیش رو می‌باشد. از طرفی هرگونه تغییر یا اصلاح بایستی به گونه‌ای باشد که تاثیر اندکی روی عملکرد نوترونیک قلب، ایمنی و قابلیت‌های بهره‌برداری راکتور داشته باشد.

از جمله خصوصیات مهم که باید مورد توجه باشد حاشیه خاموشی، توزیع شار نوترون، مقدار شار محلی در مکان‌هایی خاص، طول دوره سوخت‌گذاری و شرایط بهره‌برداری است. با در نظر گرفتن الزامات و محدودیت‌های گفته شده، در این تحقیق یک سامانه خاموشی دوم طراحی و بهینه‌سازی شده است.

روش کار:

راکتور تحقیقاتی تهران در رده راکتورهای تحقیقاتی با قدرت متوسط، راکتوری استخری با قلب باز، از نوع سوخت صفحه‌ای، دارای کندکننده و خنک‌کننده آب سبک و بازتابنده گرافیت است. این راکتور دارای یک شبکه پایه 9×6^2 در پایین قلب است که مجتمع‌های سوخت استاندارد^۲، سوخت کنترل^۳، گرافیت^۴ و محل‌های پرتودهی^۵ روی آن قرار دارد. فعال‌سازی سامانه خاموشی اول با استفاده از فرمان صادر شده توسط آشکارسازها و حسگرهای مختلف نصب شده در

^۱Locally flux

^۲Grid plate

^۳SFE, Standard Fuel Element

^۴CFE, Control Fuel Element

^۵GR, Graphite Box

^۶IR, Irradiation Box



قسمت‌های گوناگون راکتور یا به صورت دستی انجام می‌شود. سامانه ایمنی راکتور می‌تواند دستور خاموشی راکتور را از سامانه‌های پایش مختلف وابسته به آنها از جمله شار نوترون، دمای خنک کننده، شارش جریان خنک‌کنندگی عبوری از قلب یا دیگر سامانه‌ها مثل سامانه پایش سوخت و سامانه پایش پرتوی محیط بگیرد [۶]. سامانه خاموشی دوم باید قادر به زیربحرانی کردن راکتور در بازه زمانی قابل قبول و با حاشیه ایمنی کافی باشد. از طرفی، جانمایی، تعمیر و نگهداری سامانه باید قابل اجرا و کم هزینه بوده و نباید سبب تغییرات عمده در وضعیت قلب و یا ساختارهای آن شود. با توجه به آنچه گفته شد، محفظه‌های سامانه خاموشی دوم به صورت جانمایی دو محفظه توخالی در ۴ عدد از گرافیت‌های ردیف ۲ و ۹ در نظر گرفته که در شکل (۱) نمایش داده شده است. الکترونیک و پشتیبانی این سامانه شبیه سامانه خاموشی اول راکتور است و عملکرد این سامانه به صورت تزریق محلول جاذب نوترون از مخزن‌های نگهداری جاذب به درون محفظه‌ها پس از صدور دستور خاموشی توسط سامانه کنترلی راکتور است. در همه محاسبات انجام شده برای این بخش، نتایج با بیشینه خطای نسبی ۵۰ pcm گزارش شده است.

Thermal Column							
۹	IR	GR	GR	GR	GR	GR	
	Second Shutdown Box 1						
۸	SFE	RR	SFE	SFE	SFE	SFE	
۷	SFE	SFE	SFE	SFE	SR2	SFE	
۶	SFE	SR1	SFE	IR	SFE	SFE	
۵	SFE	SFE	SFE	SFE	SR3	SFE	
۴	SFE	SFE	SR4	SFE	SFE	SFE	
۳	IR	SFE	SFE	SFE	SFE	IR	
۲	GR	Second Shutdown Box 2					GR
	GR	GR	GR	GR	GR	GR	
۱	GR	GR	GR	GR	GR	GR	
	A	B	C	D	E	F	

شکل (۱). قلب راکتور تحقیقاتی تهران پس از جانمایی سامانه خاموشی دوم.



توانایی این سامانه برای زیربحرانی کردن راکتور در یک مدت محدود به ظرفیت، حجم و کیفیت محفظه‌های آن و همچنین کمیت و کیفیت جاذب بستگی دارد. در این مطالعه چند مولفه شامل ضخامت دیواره محفظه، پهنای محفظه و کیفیت جاذب استفاده شده، بررسی و مقادیر بهینه هرکدام از آنها مشخص شده است. مشخصات مربوط به سامانه خاموشی دوم پیشنهادی به اختصار در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱). مشخصات سامانه خاموشی دوم.

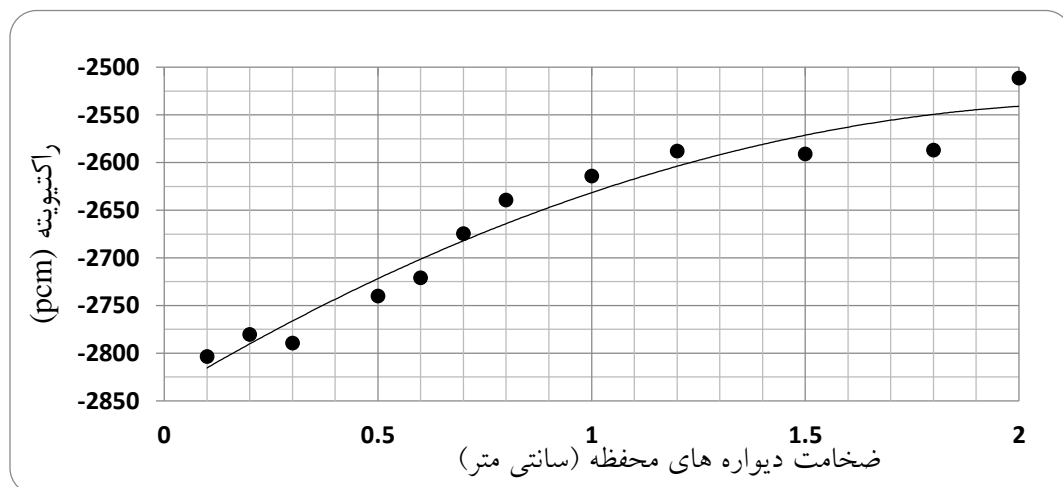
مقدار	مولفه	مقدار	مولفه
۳۰	پهنای محفظه (میلی متر)	۳	ضخامت دیواره (میلی متر)
AL-6061	جنس دیواره	۷۰۳	ارتفاع محفظه (میلی متر)
محلول اسید بوریک	جاذب	۷۷۰	طول محفظه (میلی متر)

نتایج:

نتایج بررسی تاثیر سه مولفه ضخامت دیواره محفظه، پهنای محفظه و کیفیت جاذب استفاده شده در محفظه‌ها روی عملکرد سامانه خاموشی دوم و بهینه‌سازی این سامانه در زیر آورده شده است.

الف) ضخامت دیواره آلومینیومی محفظه سامانه خاموشی دوم

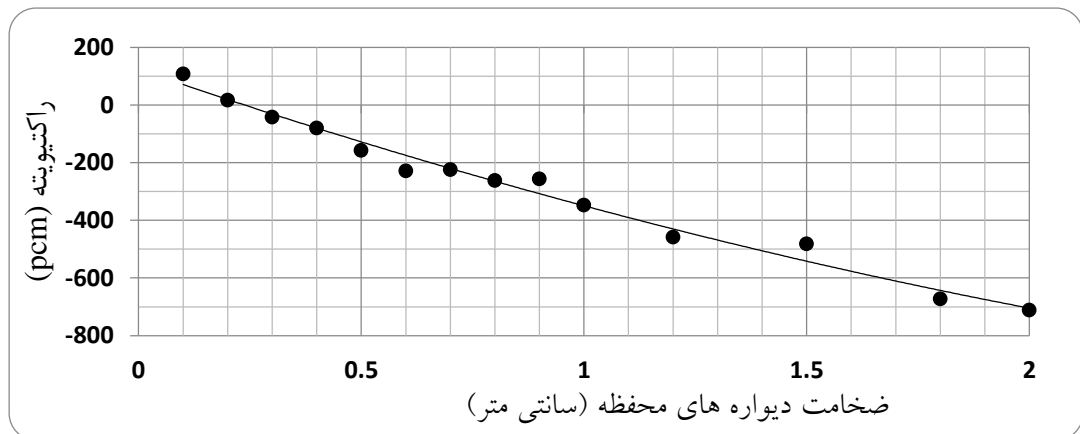
تاثیر ضخامت دیواره بر ارزش راکتیویته هنگامی که محفظه با و بدون جاذب است در شکل (۲) و شکل (۳) نشان داده شده است. در این محاسبات از اسید بوریک با غنای ۹۹٪ بور ۱۰، غلظت ۵۰ گرم اسید بوریک در یک لیتر آب و پهنای محفظه ۳ سانتی متر استفاده شده است.





شکل (۲). اثر ضخامت دیواره‌های محفظه جاذب روی راکتیویته با وجود جاذب

همان‌گونه که از شکل (۲) دیده می‌شود اضافه شدن ضخامت دیواره‌های محفظه جاذب سبب کاهش اثر سامانه خاموشی دوم با وجود جاذب است، خواهد شد.

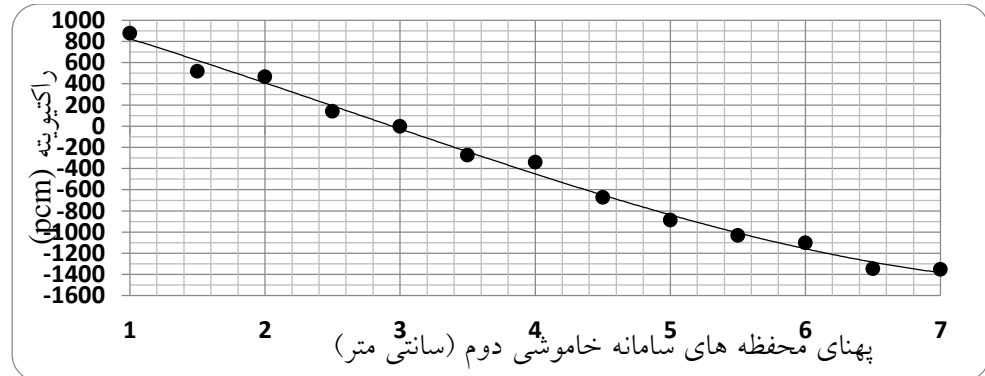


شکل (۳). اثر ضخامت دیواره‌های محفظه جاذب روی راکتیویته بدون وجود جاذب

همان‌گونه که از شکل (۳) دیده می‌شود افزایش ضخامت دیواره‌های محفظه جاذب سبب اثر منفی روی راکتیویته اضافی قلب می‌شود. از این رو با توجه به اثر منفی افزایش ضخامت دیواره‌های محفظه جاذب که در شکل (۲) و شکل (۳) نمایش داده شده است و بادر نظر گرفتن امکان ساخت و لزوم داشتن استحکام لازم، ضخامت ۳ میلی‌متر به عنوان ضخامت بهینه برای دیواره‌های محفظه جاذب در نظر گرفته خواهد شد.

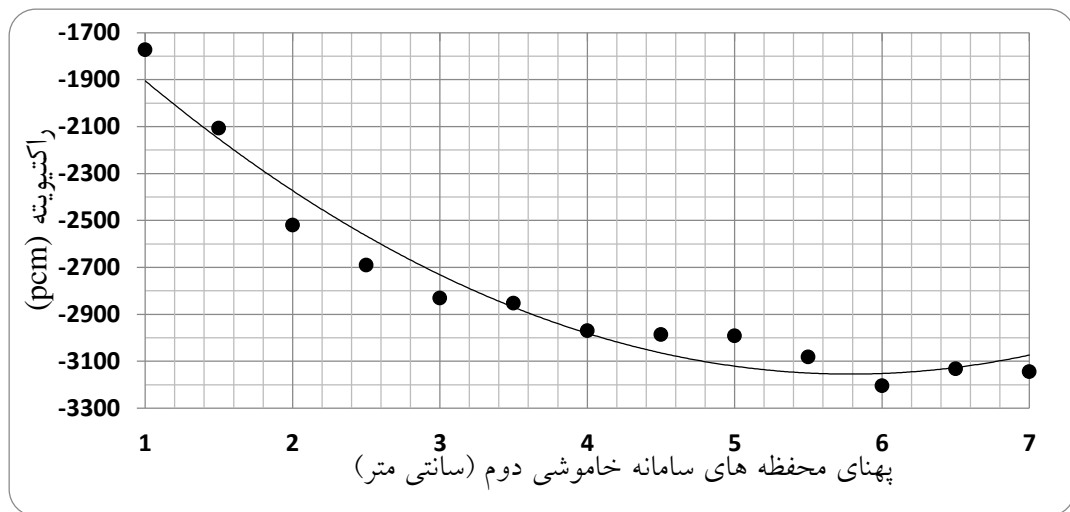
ب) پهنای محفظه سامانه خاموشی دوم

تاثیر تغییر پهنای محفظه حاوی جاذب سامانه خاموشی دوم به دو صورت بررسی می‌شود، ابتدا اثر منفی ناشی از کارگذاری آن درون قلب، هنگامی که حاوی نیتروژن است و سپس راکتیویته منفی جاذب قابل تزریق به سامانه خاموشی دوم بررسی می‌شود. در این محاسبات از اسید بوریک با غنای ۹۹٪ بور ۱۰، غلظت ۵۰ گرم اسید بوریک در یک لیتر آب و ضخامت دیواره ۳ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل (۴). اثر پهنای سامانه خاموشی دوم حاوی نیتروژن روی راکتیویته قلب

همان گونه که انتظار می رود و از شکل (۴) دیده می شود، هرچه پهنای محفظه سامانه خاموشی دوم بیشتر باشد، از آنجا که محفظه ها در حالت عادی کارکرد قلب از نیتروژن پر می شود، ناحیه فرار نوترون بیشتری در ردیف های ۲ و ۹ قلب ایجاد می شود که سبب اثر منفی بیشتری روی راکتیویته قلب راکتور خواهد شد.



شکل (۵). اثر پهنای سامانه خاموشی دوم حاوی جاذب روی راکتیویته

همان گونه که از

شکل (۵) دیده می شود، با افزایش پهنای سامانه خاموشی دوم تا ۳ سانتی متر کارایی سامانه افزایش می یابد، در حالی که با افزایش این پهنای تا ۶ سانتی متر افزایش ناچیزی در کارایی این سامانه اتفاق می افتد و با افزایش بیشتر پهنای اثر مثبت دیده



نخواهد شد. از طرفی اضافه کردن به پهنا همان‌طور که از شکل (۴) قابل مشاهده است سبب کاهش راکتیویته اضافی قلب هنگام کارکرد عادی می‌شود. با در نظر گرفتن روندهای شکل (۴) و

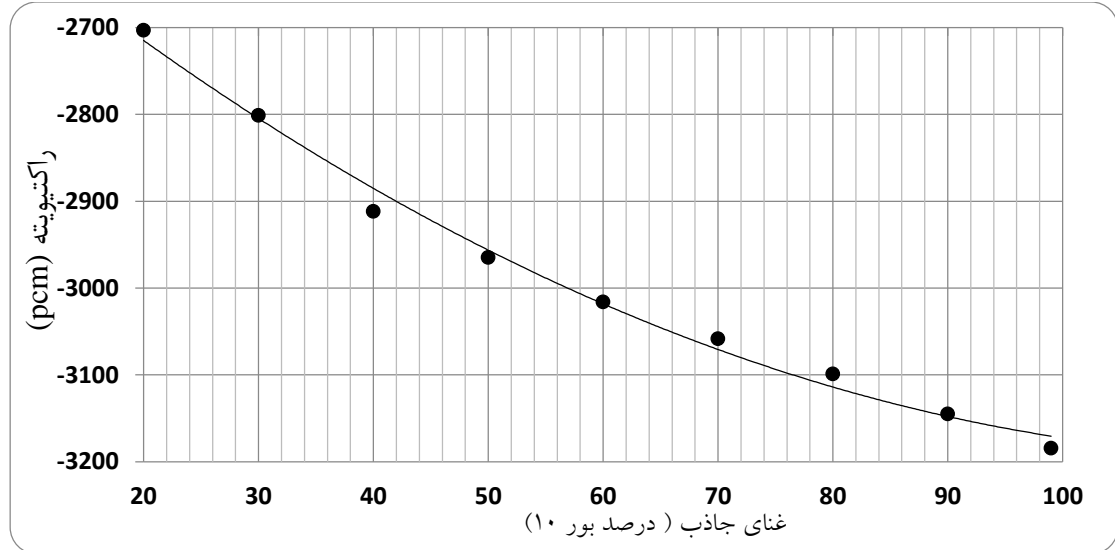
شکل (۵)، پهنا ۳ سانتی‌متر به‌عنوان پهنا بهینه برای سامانه خاموشی دوم انتخاب می‌شود.

پ) غلظت جاذب حل شده و میزان غنای جاذب

در این محاسبات از پهنا ۳ سانتی‌متر و ضخامت دیواره محفظه ۳ میلی‌متر استفاده شده است. برای بررسی تاثیر غلظت جاذب روی عملکرد سامانه از اسید بوریک ۹۹٪ غنی شده با بور ۱۰ استفاده شده است که میزان غلظت آن در آب از ۵ گرم در لیتر تا حد اشباع آن که ۵۰ گرم در لیتر است تغییر داده شده است.



شکل (۶). اثر غلظت اسید بوریک در آب روی راکتیویته قلب



شکل (۷). اثر غنی‌سازی بر عملکرد سامانه خاموشی دوم

همان‌طور که از شکل (۶) دیده می‌شود اضافه کردن میزان جاذب در حجم معینی آب در ابتدا اثر شدیدی دارد که در ادامه با شیب ملایم ادامه پیدا می‌کند، ولی در انتها اضافه کردن غلظت جاذب اثر چندانی روی راکتیویته اعمال شده نخواهد داشت. برای سامانه خاموشی دوم از اسید بوریک با غلظت ۴۵ گرم در لیتر استفاده می‌شود. در بررسی غنای جاذب، از اسید بوریک با غلظت ۴۵ گرم بر لیتر، پهنای محفظه ۳ سانتی‌متر و ضخامت دیواره محفظه ۳ میلی‌متر استفاده شده است. همان‌گونه که از شکل (۷) دیده می‌شود، غنی‌سازی سبب افزایش راکتیویته خواهد شد که این افزایش کارایی مستلزم هزینه اضافی بابت غنی‌سازی است. به دلیل اهمیت زیاد کارایی سامانه خاموشی دوم در افزایش ایمنی، غنای ۹۹٪ جاذب به عنوان غنای بهینه انتخاب می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری:

به دلیل شرایط خاص راکتور تهران و همچنین توصیه سازمان بین‌المللی انرژی اتمی در لحاظ نمودن گزینه‌های ایمنی بیشتر در راکتورهای هسته‌ای، وجود سامانه خاموشی دوم برای راکتور تهران توصیه می‌شود. با طراحی و جانمایی سامانه خاموشی دوم پیشنهادی درون قلب راکتور، که با تزریق محلول جاذب نوترون عمل نموده و کاملاً متفاوت و مستقل از سامانه خاموشی اول است، سطح ایمنی آن افزایش خواهد یافت، بدون آنکه تغییر عمده‌ای در ساختار قلب و شبکه نگهدارنده آن داده شود. این سامانه قادر است راکتور را با حاشیه ایمنی بالا خاموش نماید. با انجام تحلیل حساسیت و بررسی تاثیر هر کدام از مولفه‌ها روی عملکرد کلی قلب راکتور، بهینه‌سازی این سامانه انجام شده است. ضخامت بهینه



برای دیواره محفظه‌ها ۳ میلی متر، پهنای بهینه محفظه‌های تزریق جاذب ۳ سانتی متر، میزان غنای بهینه ۹۹٪ و غلظت بهینه پودر اسید بوریک برای تهیه محلول جاذب نوترون ۴۵ گرم در لیتر به دست آمده است.

مراجع:

1. Z. Wu, D. Lin, and D. Zhong, *The Design Features of the HTR-10*, Nuclear Engineering and Design, (2002). 218(1): p. 25-32.
2. C.M. Tseng, *Second Trip System for NRU Research Reactor*, Nuclear Engineering and Design, (1994). 152(1): p. 175-181.
3. K. Böning and J. Blombach, *Design and Safety Features of the Planned Compact Core Research Reactor FRM-II*, (1995).
4. S. Kim, *The OPAL (Open Pool Australian Light-Water) Reactor in Australia*, Nuclear Engineering and Technology, (2006). 38 (5): p. 443.
5. Gaheen, M.A., *Safety Aspects of Research Reactor Core Modification for Fission Molybdenum-99 Production*, RERTR 2010- 32th International Meeting on Reduced Enrichment for Research Reactors, (2010). Lisbon, Portugal.
6. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*, (2009). Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.