Archi

مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۹۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 92, No. 2, 2020

آنالیز اثر میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی رآکتور تهران

احمد لشکری*، فرخ خوش‌احوال، مسعود امین مظفری

پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران ـ ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۷/۱۷

چکیده

در این مقاله به اثر حضور میله‌های کنترل روی پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی رآکتور تهران در شرایط ایستا و گذرا پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا اثر حضور میله‌های کنترل بر روی قله توان در ٪۷۰ حضور میله‌های کنترل در قلب رآکتور تهران به صورت یک تابع نرمالیزه شده به جای تابع معمول کسینوسی در کد TERMIC به کار رفت. نتایج حاصل از آن روی پارامترهای ترموهیدرولیکی در شرایط ایستا و گذرا بررسی گردید. نتیجه این بررسی‌ها در بخش ایستا با توان ۵ MW، کاهش حاشیه‌های ایمنی نسبت به وضعیتی بود که میله‌های کنترل خارج از قلب بودند. در بخش گذرا نیز، تابع توزیع توان محوری در ٪۷۰ جای‌گزین تابع کسینوسی محوری در کد PARET گردید. تأثیر مستقیم افزایش قله توان در اثر حضور میله کنترل باعث ایجاد جوشش نقطه‌ای در بخش‌هایی از کانال محوری سیال خنک‌کننده می‌گردد. تولید بخار (خلأ) در جوشش نقطه‌ای و بازخورد آن باعث کاهش بیشینه قله توان و دماهای سوخت، غلاف و خنک‌کننده گردید. در بخش پایانی، اثر مستقیم میله‌های کنترل به همراه پارامترهای متأثر از حضور میله‌های کنترل (ضرایب راکتیویته دمایی) روی پارامترهای ترموهیدرولیکی بررسی گردید. افزایش بازخوردهای دمایی و خلأ در اثر حضور میله‌های کنترل به همراه اثر مستقیم میله‌های کنترل، باعث افزایش چشمگیر تمام حاشیه‌های ایمنی ترموهیدرولیکی گردید.

کلیدواژه‌ها: رآکتورهای تحقیقاتی، ترموهیدرولیک، رفتارهای گذرا، پارامترهای ایمنی

Control rods effect analyses on thermo-hydraulic safety parameters in TRR

A. Lashkari*, F. Khoshahval, M. Amin Mozafari

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Research Article

Received 5.5.2019, Accepted 9.10.2019

Abstract

In this study, the effect of control rods on TRR safety parameters was investigated in both cases of static and transient behavior. In this paper, the effect of the control rods movements (70%) on the power peaking was used in the form of the normalized function instead of the COS function in the TERMIC cod. The results of the new function were investigated on thermo-hydraulic parameters in the steady-state and transient conditions. In the steady-state with 5 MW thermal power, the results showed that the safety margin in new condition (70% insertion) decreased respect to the state that all control rods where out. Also, in the transient section, the axial function of the power distribution was applied in the input of the PARET cod. The direct influence of control rods on the power peaking was the production of nucleate boiling earlier than the COS shape function. This effect, reduced the power and temperatures due to the void coefficient feedback. In the last section, the effect of the control rods insertion on the reactivity feedback coefficient was considered in the transient scenario. Increment of the reactivity feedback coefficient due to control rods insertion along with the direct effect of control rods caused a significant decrease in all thermo-hydraulic safety parameters.

Keywords: Research reactors, Thermo-hydraulic, Transient behaviors, Safety parameters

*Email: alashkari@aeoi.org.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

رآکتورهای تحقیقاتی به‌دلیل کاربردهای وسیع در زمینه‌های علمی، صنعتی و کاربردهای پزشکی، نقش مهمی در حوزه‌های علوم هسته‌ای و فن‌آوری دارند. معمولاً هدف رآکتورهای تحقیقاتی داشتن شار نوترونی بیشینه در محل تابش‌دهی نوترون می‌باشد. این رآکتورها علاوه بر شرط شار بیشینه، بایستی پارامترهای ایمنی را نیز برآورده نمایند. پارامترهای ایمنی قلب یک رآکتور هسته‌ای شامل پارامترهای نوترونیک و ترموهیدرولیک می‌باشد. پارامترهای ترموهیدرولیک از طریق فاکتوری به نام قله توان[1] (PPF) به پارامترهای نوترونیک مرتبط می‌گردند. فاکتور قله توان به‌صورت نسبت توان موضعی به توان متوسط کل رآکتور تعریف می‌شود. این فاکتور می‌تواند محوری[2] یا شعاعی[3] باشد که از حاصل‌ضرب آن دو فاکتور قله توان کل به‌دست می‌آید. مطابق با معیارهای ایمنی رآکتور تهران PPF کل بایستی کم‌تر از عدد ۳ باشد [۱]. لازم به توضیح است که مقدار عددی ۳ با در نظر گرفتن اثر میله‌های کنترل و فاکتورهای مهندسی ابعادی و نقطه داغ به صورت محافظه کارانه در نظر گرفته شده است. فاکتور تصحیح اثر میله‌های کنترل بر روی قله توان کل مقدار ۱٫۱۵ می‌باشد که در گزارش آنالیز ایمنی رآکتور تهران ذکر شده است. دانستن مقدار این پارامتر جهت انجام آنالیزهای ترموهیدرولیک و آنالیز ایمنی حوادث ضروری است. نکته قابل تأمل این‌که مقدار عددی به کار رفته برای APPF محوری در اسناد رآکتور برابر با ۱٫۳ می‌باشد [۱] در صورتی‌که مقدار تجربی به‌دست آمده آن ۱٫۷ می‌باشد. علت این اختلاف به اثر میله‌های کنترل بر می‌گردد که این موضوع با استفاده از بسته نرم‌افزاری MTR_PC برای آرایش قلب ۶۱ رآکتور تهران پیش‌تر انجام شده و نتایج آن در کنفرانس فیزیک سال ۱۳۹۴ ارایه گردیده است [۲]. در گزارش آنالیز ایمنی راکتور[4] تهران تنها به ضریب تأثیر میله‌های کنترل بر روی قله توان کل (۱٫۱۵) اشاره شده و به تأثیر آن بر روی قبله توان محوری و شعاعی اشاره‌ای نشده است. منحنی تغییرات ضریب تأثیر میله‌های کنترل بر روی قله توان کل در مرجع ۳ برای رآکتور تهران محاسبه گردیده است [۳]. از آن‌جایی‌که لازمه آنالیز رفتارهای گذرا، محاسبه پارامترهای نوترونیک نظیر ضرایب راکتیویته و سینتیک می‌باشد، در تحقیق دیگری اثر حضور میله‌های کنترل بر روی پارامترهای نوترونیک (ضرایب راکتیویته + پارامترهای سینتیک) انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که حضور میله‌های کنترل در قلب ۶۱ رآکتور تهران باعث افزایش ضرایب راکتیویته دمایی به خصوص در ضریب راکتیویته دمایی کندکننده می‌گردد. مقادیر متوسط مربوط به ضریب راکتیویته دمایی تنها، ضریب راکتیویته چگالی تنها و جمع این دو ضریب در کندکننده به‌ترتیب ۵۶، ۱۶۰ و ۹۸ درصد افزایش نسبت به حالت عدم حضور میله‌های کنترل را در بازه ۰ تا ٪۷۰ حضور میله‌های کنترل را نشان می‌دهد. حضور میله‌های کنترل اثر محسوسی بر روی پارامترهای سینتیک (کسر مؤثر نوترون‌های تأخیری و عمر نوترون‌های آنی) ندارد [۴].

در این مقاله در ادامه کار، به اثر حضور میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی پرداخته می‌شود. برای محاسبه اثر میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی، رفتار حرارتی رآکتور تهران بایستی در دو وضعیت پایدار و در حالت گذار بررسی شود. با استفاده از نتایج قبلی و محاسبات نوترونیک جدید، توزیع شار حرارتی محوری و شعاعی را محاسبه کرده سپس با استفاده از توزیع شار حرارتی به دست آمده به تحلیل رفتار ترموهیدرولیکی قلب رآکتور تهران در دو وضعیت ایستا و گذرا پرداخته می‌شود.

۲. روش کار

قلب رآکتور تهران شامل بسته‌های سوخت از نوع MTR است که در یک شبکه ۶×۹ چیده می‌شوند. مشخصات دقیق بسته‌های سوخت و پارامترهای مربوط به قلب رآکتور تهران در مراجع [۱] و [۴] آمده است. آرایش قلب تعادلی شماره ۶۱ در شکل ۱ آورده شده است. برای انجام محاسبات نوترونیک از بسته نرم‌افزاری MTR-PC استفاده شده است [۵]. در قسمت نوترونیک عمدتاً از دو کد WIMS-D/4 [۶] و CITVAP [۷] استفاده شده است که توسط کد مدیریتی HXS با یک‌دیگر در ارتباطند.

1. Power Peaking Factor
2. Axial Power Peaking Factor (APPF)
3. Radial Power Peaking Factor
4. Safety Analyses Report (SAR)

www.SID.ir

Archive of SID

	A	B	C	D	E	F	
9	E.B	GR	GR	GR	E.B	GR	
8	SFE	RR CFE	SFE	SFE	SFE	SFE	
7	SFE	SFE	SFE	SFE	SR2 CFE	SFE	
6	SFE	SR1 CFE	SFE	E.B	SFE	SFE	
5	SFE	SFE	SFE	SFE	SR3 CFE	SFE	
4	SFE	SFE	SR4 CFE	SFE	SFE	SFE	
3	E.B	SFE	SFE	SFE	SFE	E.B	
2	GR	E.B	E.B	GR	GR	GR	
1	GR	GR	GR	GR	GR	GR	

SFE: STANDARD FUEL ELEMENT
CFE: CONTROL FUEL ELEMENT
GR-BOX: GRAPHITE BOX **E.B**: EMPTY BOX
SR: SHIM SAFETY ROD **RR**: REGULATING ROD

شکل ۱. آرایش قلب ۶۱ رآکتور تحقیقاتی تهران.

کد WIMS-D/4 به طور معمول سطح مقطع‌های ماکروسکوپیک در ۶۹ گروه از انرژی را برای تمام مواد به کار رفته در کل قلب رآکتور را محاسبه کرده و نهایتاً در سه گروه انرژی فشرده می‌کند. کد محاسبات قلب CITVAP معادله پخش چند گروهی را در سه بعد X-Y-Z و در ۳ گروه انرژی، متناسب با تقسیم‌بندی ۵-۴۵-۶۹ از کتابخانه WIMS در قلب رآکتور را حل می‌کند. مدل‌سازی نوترونیک قلب رآکتور تهران اساساً شامل انجام محاسبات ۴ سلول اصلی، بسته‌های سوخت استاندارد، بسته‌های کنترلی، بازتابنده‌ها و کانال‌های تابش‌دهی می‌باشد و براساس مرجع [۴] محاسبه می‌گردد. به‌منظور انجام محاسبات ترموهیدرولیکی استاتیک از کدهای CAUDVAP V 3.60 و TERMIC V 4.1 مجموعه MTR-PC V 3.0 استفاده شده است [۸، ۹]. برنامه CAUDVAP می‌تواند توزیع سرعت جریان خنک‌کننده را در حالت ایستا در مجموعه کانال‌های مختلف موازی باهم که دارای پلنیوم ورودی و خروجی مشترک هستند را، محاسبه کند. این کد قابلیت مدل‌سازی توزیع سرعت در حالت‌های گذرا را ندارد. برنامه CAUDVAP جریان بین کانال‌ها را با استفاده از روش تکرار[1] محاسبه می‌کند در نتیجه مقادیر جریان برای هریک از کانال‌ها به ازای یک مقدار افت فشار یکسان محاسبه می‌شود. کد TERMIC یک کد ترموهیدرولیک استاتیک می‌باشد که برای طراحی هیدرولیک حرارتی بسته‌های سوخت صفحه‌ای شکل توسعه داده شده است. کد TERMIC دمای سوخت و خنک‌کننده را در طول کانال‌های مجتمع سوخت، شار حرارتی بحرانی، توان مورد نیاز برای آغاز باز توزیع جریان و نیز حداکثر مقدار مجاز توان و شار حرارتی را به ازای معیارهای ایمنی تعیین شده برای عدم بروز آغاز جوشش هسته‌ای (ONB[2])، انحراف از جوشش هسته‌ای (DNBR[3]) و ناپایداری جریان به صورت تابعی از سرعت خنک‌کننده محاسبه می‌نماید. ONB که معمولاً به عنوان محدودیت‌های طراحی در بهره‌برداری در شرایط ایستا به کار می‌رود، توسط رابطه برگلس-روشنف[4] [۱۰]. تعیین می‌گردد. DNB برای کانال‌های جریان مستطیلی در رآکتورهای با فشار کم مانند رآکتور تهران از روابط میرشاک[5] و سودو- میشی[6] استفاده می‌گردد [۱۱]. در آنالیز کانال‌های خنک‌کننده، فرض می‌شود که این کانال‌ها توسط صفحاتی که هم‌عرض صفحات سوخت هستند، محدود شده‌اند. در این تحقیق کانال خنک‌کننده به ۲۱ ناحیه محوری تقسیم‌بندی می‌شود. شکل شار حرارتی به کار رفته در این کد به دو صورت کسینوسی و یا هر شکل نرمالیزه شده‌ای که توسط کاربر پیشنهاد می‌شود، به کار برده می‌شود. که در این تحقیق از داده‌های نرمالیزه شده به دست آمده از بخش نوترونیک استفاده شده است. هم‌چنین فاکتورهای عدم قطعیت پارامترهای مختلف مورد نیاز در ورودی کد TERMIC از SAR رآکتور استخراج شده و در جدول ۱ ارایه شده‌اند.

1. Iterative Scheme
2. Onset of Nucleate Boiling
3. Departure from Nucleate Boiling Ratio
4. Bergles-Rohsenow
5. Mirshak
6. Sudo-Mishima

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. عدم قطعیت پارامترهای مختلف مورد نیاز در ورودی کد ERMIC

پارامتر	عدم قطعیت
دمای خنک‌کننده در ورودی قلب	۲°C
میزان اورانیم در هر صفحه سوخت	۲٪
جرم اورانیم ۲۳۵ در هر صفحه سوخت	۲٪
قدرت اندازه‌گیری شده	۵٪
ناحیه اکتیو سطح سوخت صفحه‌ای	۵٪
سطع مقطع صفحه سوخت	۱۰٪
سرعت خنک‌کننده در کانال نامی	۱۰٪
توزیع اورانیم در صفحه سوخت	۸٪
ضخامت سوخت	۱۰٪
فرمول دیتوس باتلر	۲٪
فشار جو	۴٪
ظرفیت گرمای ویژه آب	۲٪
اتلاف در اثر فرمول افت فشار	۱۰٪
افت فشار تکینه‌گی	۱۰٪
شروع جوشش نقطه‌ای	۲۵٪
ضخامت صفحه	۲٪
عرض کانال خنک‌کننده	۷٪
همگن بودن U۲۳۵	۸٪

برای مطالعه کامل اثر میله‌های کنترل در قلب رآکتور علاوه بر حالت استاتیک بایستی پارامترهای ترمودینامیک در حالت گذرا نیز بررسی شوند. برای انجام این بخش از محاسبات نیز از کد PARET استفاده می‌شود. یک نسخه تغییر یافته از کد PARET برای آنالیز حوادث رآکتورهای تحقیقاتی مانند تزریق راکتیویته و از دست رفتن جریان خنک‌کنندگی (LOFA[1]) به کار می‌رود [۱۲]. کد PARET قادر به شبیه‌سازی رآکتورهای خنک‌شونده با آب، با بیشینه چهار ناحیه توانی متفاوت می‌باشد که در این تحقیق تنها از دو ناحیه مرسوم به کانال داغ و متوسط استفاده شده است. هر یک از این نواحی توسط یک مجموعه از صفحه سوخت به همراه کانال خنک‌کننده آن در نظر گرفته می‌شود و می‌توانند بیشینه به ۲۱ نقطه در راستای محوری تقسیم‌بندی شوند. محاسبات هیدرولیکی در کد PARET براساس مدل انتگرال اندازه حرکت انجام می‌گیرد. این مدل شامل حل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به همراه بازخوردهای راکتیویته می‌باشد. ضرایب راکتیویته به کار رفته در این کد شامل ضرایب دمایی سوخت (اثر دوپلر)، خنک‌کننده و اثر تولید بخار[2] می‌باشد. رفتارگذرای رآکتور در اثر اعمال راکتیویته به صورت تابعی از زمان مشخص می‌گردد. این رفتار زمانی قدرت رآکتور با حل عددی معادله سینتیک نقطه‌ای به دست می‌آید. انتقال حرارت در سوخت و سیال خنک‌کننده مجاورش به صورت یک بعدی در راستای شعاعی محاسبه می‌شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ حالت استاتیک

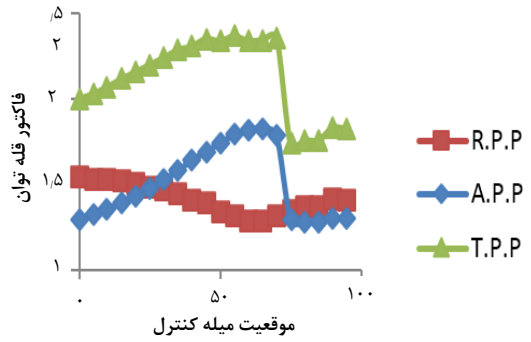
شکل ۲ منحنی تغییرات فاکتور قله توان را برحسب موقعیت میله‌های کنترل در قلب ۶۱ را نشان می‌دهد [۲]. با افزایش میله‌های کنترل فاکتور قله توان شعاعی (R.P.P[3]) کاهش و قله توان محوری (A.P.P) افزایش می‌یابد و این روند تا ٪۷۰ ادامه داشته سپس جهت تغییرات معکوس می‌گردد. از آن‌جایی‌که در اجرای کد CITVAP توان رآکتور تهران ثابت و ۵MW در نظر گرفته می‌شود، حضور میله کنترل باعث کاهش توان نمی‌شود. ادامه حضور میله‌های کنترل باعث تغییر توزیع چگالی توان در راستای محوری و شعاعی شده، به گونه‌ای که جمع کل توان ثابت است. در راستای محوری حضور میله‌های کنترل تا حدود ٪۷۰ باعث افزایش و تغییر مکان قله توان محوری می‌شود. با افزایش حضور میله‌های کنترل (۷۰ تا ٪۱۰۰)، توزیع توان محوری معکوس شده و به حالت تقارن اولیه برمی‌گردد. شکل ۳ توزیع چگالی توان محوری به متوسط دانسیته توان را به ازای درصدهای متفاوت از حضور میله کنترل را در قلب ۶۱ نمایش می‌دهد. درصدهای صفر و ۹۰، درصد توزیع مشابه و یکنواختی دارند و حالت ٪۷۰ بیش‌ترین عدم تقارن را دارد. بنابراین حضور محوری میله‌های کنترل در قلب باعث افزایش عدم تقارن توزیع توان تا حدود ٪۷۰ گشته و ادامه حضور میله‌ها باعث برگشت تقارن توزیع توان می‌گردد. با توجه به این‌که ارزش انتگرالی و دیفرانسیلی کل میله‌های کنترل خطی نبوده و شدیداً وابسته به مکان است، تغییر موقعیت میله‌ها مثلاً از ۷۰ تا ٪۷۵، باعث توزیع توان کاملاً

1. Loss of Flow Accident

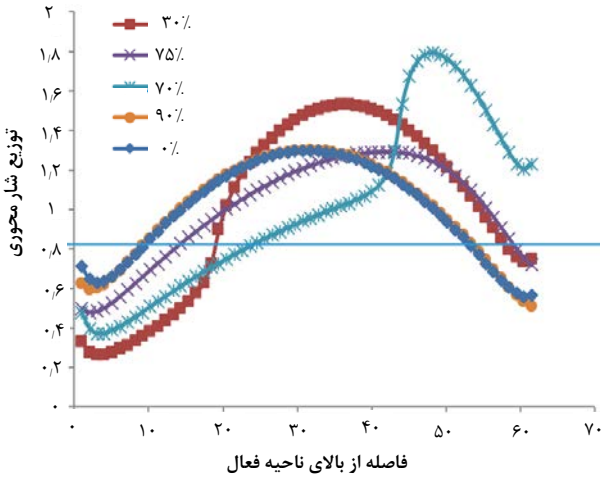
2. Void
3. Radial Power Peaking Factor

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. منحنی تغییرات فاکتور قله توان برحسب موقعیت میله‌های کنترل.



شکل ۳. توزیع نسبی شار حرارتی محوری در قلب ۶۱ برحسب موقعیت میله‌های کنترل.

متفاوتی می‌گردد. در بخش قله توان شعاعی نیز حضور میله‌های کنترل تا ٪۷۰ باعث می‌شود قسمت پایینی قلب سهم بیش‌تری از تولید توان را داشته باشد. این موضوع باعث توزیع یکنواخت‌تر تولید توان شعاعی در بخش پایینی قلب می‌گردد. از آن‌جایی‌که قله توان شعاعی در این بخش از قلب اتفاق می‌افتد، در نتیجه قله توان شعاعی تا ٪۷۰ از حضور میله‌های کنترل کاهش می‌یابد. پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی برای داغ‌ترین نقطه از کانالی انجام می‌گیرد که سهم تولید توان شعاعی بیش‌تری دارد. برای یافتن چنین نقطه‌ای بایستی از فاکتور قله توان کل (T.P.P[1]) استفاده کرد. با توجه به شکل ۲ در زمانی که میله‌های کنترل در وضعیت ٪۷۰ قرار دارند (درصد میزان داخل بودن)، فاکتور قله توان بیشینه است ولی فاکتور قله توان کل که ناشی از حاصل‌ضرب دو فاکتور شعاعی و محوری است، در بازه ٪۴۵ تا ٪۷۰ مقدار بیشینه تقریباً یکسانی را دارد در نتیجه در ادامه، محاسبات ترموهیدرولیک تنها برای دو موقعیت صفر و ٪۷۰ محاسبه شده است. با استفاده از کد TERMIC دماهای مربوط به غلاف و مرکز سوخت محاسبه می‌شود. با توجه به اندازه این دماها حاشیه‌های ایمنی کارکرد رآکتور در شرایط قدرت مشخص می‌گردد. همان‌طور که در مبحث روش مدل‌سازی بیان شد، سرعت خنک‌کننده در نتایج حاصل از کد TERMIC مؤثر است. از این‌رو توزیع جریان و سرعت خنک‌کننده توسط کد CAUDVAP محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. نتایج محاسبات برای دو حالت مربوط به موقعیت صفر و ٪۷۵ از حضور میله‌های کنترل در آرایش قلب شماره ۶۱ آورده شده است. پارامترهای ترموهیدرولیکی در مجتمع‌های سوخت استاندارد، به دلیل آن‌که مطابق با محاسبات CITVAP نقطه داغ در یکی از آن‌ها اتفاق می‌افتد، برای شار ماکزیمم ارایه شده و با محدوده‌های ایمنی ترموهیدرولیکی SAR رآکتور تهران مقایسه شده‌اند. آنالیزهای ترموهیدرولیکی انجام گرفته بر روی دو وضعیت پیشنهاد شده بیان‌گر این واقعیت است که علی‌رغم اعمال اثر میله‌های کنترل، هیچ یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی از محدوده‌های مجاز فراتر نرفته و همگی با معیارهای ایمنی مطرح شده در بخش معیارهای ایمنی سازگاری دارند. در صورتی‌که حاشیه‌های ایمنی مربوط به ٪۷۰ حضور میله کنترل کم‌تر از حالتی است که اثر میله‌های کنترل در نظر گرفته نمی‌شود.

اختلاف دمای مرکز سوخت در دو وضعیت در حدود ۶ درجه سانتی‌گراد است. توزیع محوری دمای سطح غلاف برای دو وضعیت صفر و ٪۷۰ در شکل ۴ نمایش داده شده است. به وضوح دیده می‌شود که حضور میله‌های کنترل در ٪۷۰ باعث افزایش و جابه‌جایی قله توان به سمت پایین قلب می‌گردد و به طبع آن دمای بیشینه غلاف افزایش و جابه‌جا می‌شود. معیار ایمنی برای کارکرد سالم غلاف در شرایط بهره‌برداری ایمن، دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تعریف شده است که در دماهای پایین‌تر از این دما احتمال خوردگی در غلاف کم‌تر است [۱].

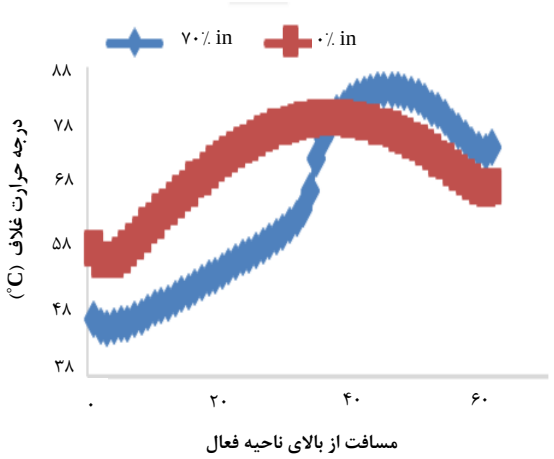
1. Total Power Peaking Factor

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. نتایج آنالیز ترموهیدرولیک

پارامتر	مقدار		معیارهای ایمنی [۱]
موقعیت میله‌های کنترل (٪)	۷۰٪	۰٪	
شار خنک‌کننده (m^3hr)	۵۰۰	۵۰۰	-
سرعت خنک‌کننده(m/s)	۱٫۲۵۲	۱٫۲۵۲	۱۵٫۳>
حاشیه تا ONB	۱٫۸۸	۲٫۲۳	۱٫۳<
حاشیه تا DNB	۱۰٫۲۱۹	۱۲٫۲۹	۲<
قله دمای غلاف (°C)	۸۴٫۳	۷۹٫۷	۱۰۵>
قله دمای سوخت (°C)	۹۴٫۰	۸۷٫۸	۶۵۰>
حاشیه از دمای غلاف T_{Wall} = ۱۰۵°C	۱٫۴۵	۱٫۷۳	۱<



شکل ۴. توزیع محوری دمای سطح غلاف در قلب ۶۱ راکتور تهران.

۲.۳ حالت گذرا

اثر حضور میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی را نیز می‌توان از دو منظر بررسی کرد.

- اثر مستقیم توزیع توان ناشی از حضور میله‌های کنترل
- اثر تغییر ضرایب راکتیویته ناشی از حضور میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ترموهیدرولیک.

۱.۲.۳ اثر مستقیم توزیع توان ناشی از حضور میله‌های کنترل

در بخش اول تنها اثر تغییر شار حرارتی در اثر حضور میله‌های کنترل شبیه‌سازی می‌شود. کارت مربوط به توزیع محوری شار حرارتی در ورودی کد PARET برای دو وضعیت صفر و ۷۰ درصد مطابق با شکل ۳ تغییر داده شد. در حالتی که میله‌های کنترل کاملاً بیرون هستند توزیع شار حرارتی کسینوسی است. در این بخش تنها اثر توزیع توان تولید شده بر روی پارامترهای بیشینه دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده مقایسه شده است. مطالعه رفتارهای گذرای راکتور تهران شامل سناریوهای متفاوتی است. در این تحقیق تنها به نتایج مربوط به یک نمونه سناریوی استاندارد می‌پردازیم. سناریوی بررسی شده تزریق $ ۱٫۵ در نیم ثانیه بدون شرط خاموشی و توان اولیه ۱ میلی‌وات در راکتور تهران است [۱]. این حادثه از جمله حوادث پایه طراحی راکتور تهران است. تحلیل نتایج این سناریو می‌تواند مبین اثر میله‌های کنترل باشد. تحلیل نتایج این سناریو می‌تواند مبین اثر میله‌های کنترل باشد. شکل ۵ توان و دماهای مرکز سوخت، غلاف و کندکننده را برای حالتی که میله‌های کنترل به طور کامل بیرون هستند و نیز حالتی که ۷۰٪ داخل قلب هستند را نمایش می‌دهند. حالت ۷۰٪ نیز به دو صورت آورده شده است که به Y و N نمایش داده شده است.

نماد Y مربوط به در نظر گرفتن اثر توزیع توان به علاوه اثر بازخوردهای حرارتی است و نماد N مربوط به اثر توزیع توان بدون در نظر گرفتن اثر بازخوردهای دمایی است. ضرایب راکتیویته و پارامترهای سینتیک مربوط به قلب ۶۱ و برای حالتی که میله‌های کنترل کاملاً بیرون هستند، در جدول ۳ آورده شده است. در حالتی که تمام میله‌های کنترل بیرون هستند، بیشینه توان راکتور در زمان ۰٫۰۷ ثانیه به ۵۰۸ MW می‌رسد. هم‌چنین بیشینه دمای مرکزی سوخت به دمای ۳۸۴ °C می‌رسد. معیار ایمنی در این تحلیل نرسیدن دمای مرکز سوخت به دمای ذوب آلومینیم (۶۵۰ °C) می‌باشد [۱]. اگر دمای مرکز سوخت بنا به هر دلیلی به دمای ذوب آلومینیم نزدیک شود، آلومینیم موجود در شبکه سرامیکی سوخت شروع به ذوب شدن کرده و باعث ایجاد آشفتگی در غلاف سوخت می‌گردد. دمای بیشینه غلاف سوخت در این سناریو در حدود ۲۶۰ °C می‌باشد و از نقطه ذوب آلومینیم فاصله زیادی دارد، ولی معیار بررسی در این‌جا بیشینه دمای مرکز سوخت بوده است. در این سناریو حداکثر دمای خنک‌کننده ۱۱۲ °C می‌رسد که کم‌تر از دمای اشباع ۱۱۴ °C می‌باشد [۱]. معیارهای ایمنی با توجه به شرایط حادثه متفاوت است. در شرایط بهره‌برداری معیار دمای غلاف است که بایستی پایین‌تر از ۱۰۵ °C باشد. در شرایط حوادث طراحی پایه مانند تزریق راکتیویته $ ۱٫۵ معیار ایمنی دمای ذوب سوخت و در شرایط حوادث ماورای طراحی، معیار دمای تاول‌زدگی[1] یا ذوب غلاف است [۱۳]. اگر بنابه هر دلیلی غلاف ذوب گردد، مواد رادیواکتیو داخل آن که ذوب شده است به بیرون انتشار می‌یابد. با توجه به

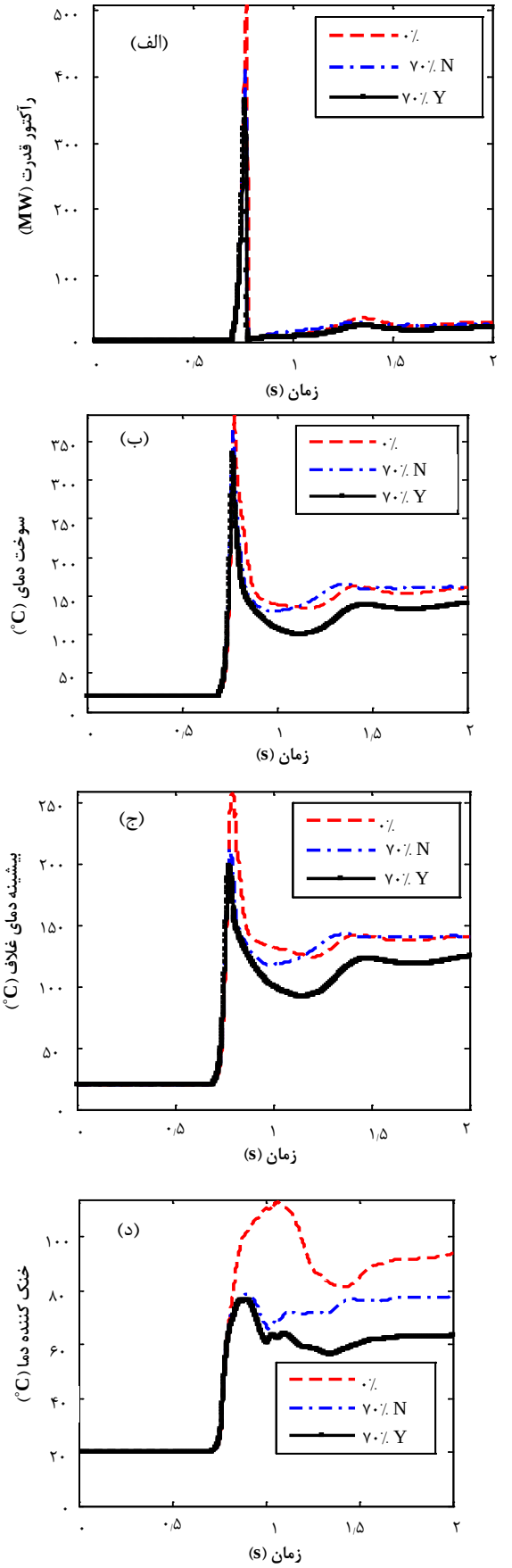
1. Blistering

www.SID.ir

Archive of SID

خروجی‌های کد PARET در کانال داغ و متوسط در دماهای بالاتر از دمای اشباع در غلاف جوشش نقطه‌ای اتفاق می‌افتد. شکل ۶ درصد بخار تولید شده در اثر جوشش نقطه‌ای در کانال متوسط مربوط به دو وضعیت ۰ و ۷۰ درصد حضور میله‌های کنترل را نشان می‌دهد. در وضعیت ۰٪ توزیع نقاط جوشش نقطه‌ای مطابق با الگوی توزیع توان محوری می‌باشد. کسر خلأ تولید شده در بیش‌ترین مقدار خود کم‌تر از ۰٫۰۳٪ می‌باشد. با حضور میله‌های کنترل در حدود ۷۰٪ شکل توزیع توان حرارتی تولید شده تغییر کرده و از حالت کسینوسی خارج می‌شود. این تغییرات را در ورودی کد وارد کرده و مجدداً سناریوی فوق اجرا می‌شود که با نشان‌گر N ۷۰٪ نمایش داده شده است. در وضعیت جدید مشاهده می‌شود که قله توان رآکتور کاهش یافته است. به گونه‌ای که از عدد MW ۵۰۸ به MW ۴۳۵٫۳ می‌رسد. دمای مرکز سوخت در حالت ۷۰٪ تغییر چندانی نسبت به ۰٪ ندارد ولی جهت آن رو به کاهش است (شکل ۵). در مورد دمای غلاف نیز کاهش ۲۰ درجه‌ای وجود دارد. در مورد دمای خنک‌کننده نیز کاهش دمای ۳۰ درجه‌ای محسوس است و علاوه بر آن، نقطه قله آن‌چنانی وجود ندارد. نتیجه قابل مشاهده در حالت ۷۰٪، بهتر شدن پارامترهای ایمنی نسبت به وضعیت ۰٪ است و این بر خلاف انتظار بود.

شکل ۶ توزیع نقاط جوشش نقطه‌ای در سطح غلاف را برای دو وضعیت ۰ و ۷۰٪ را مقایسه می‌کند. حضور هم‌زمان تمامی میله‌های کنترل باعث تغییر توزیع توان به سمت پایین صفحه سوخت شده، در نتیجه بخار در بخش‌های پایینی کانال متوسط تشکیل می‌گردد. حجم خلأ تولید شده در طول کانال متوسط برابر با مساحت زیر منحنی است که مقدار آن در ۷۰٪ (۰٫۳۰) بیش‌تر از موقعیت ۰٪ (۰٫۲۵) است که این موضوع دلیل اصلی کاهش بیشینه مقدارهای پارامترهای ترموهیدرولیکی در وضعیت ۷۰٪ می‌باشد. با توجه به این‌که ضریب راکتیویته خلأ بالاترین مقدار را در بین ضرایب راکتیویته دارد، این پارامتر در کاهش و کنترل توان نقش مؤثرتری داشته و باعث کاهش دماهای بیشینه در سوخت، غلاف و خنک‌کننده می‌شود. تحلیل فوق بدون در نظر گرفتن اثر میله‌های کنترل بر روی ضرایب راکتیویته و پارامترهای سینتیک می‌باشد. در ادامه با بهره‌گیری از نتایج به دست آمده از مرجع ۴، اثر حضور میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی با در نظر گرفتن اثر میله‌های کنترل روی ضرایب راکتیویته بررسی خواهد شد.



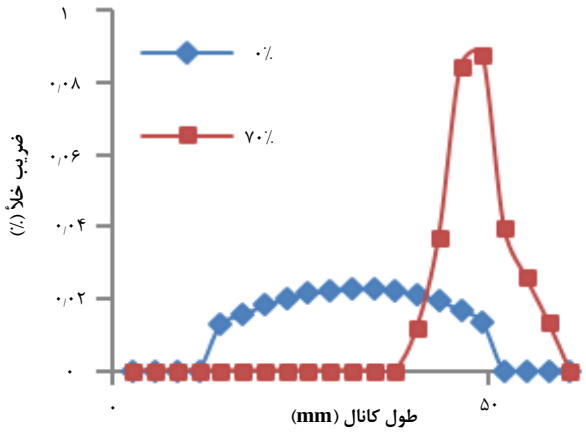
شکل ۵. رفتار زمانی پارامترهای توان (الف)، بیشینه دمای سوخت (ب)، بیشینه دمای غلاف (ج) و بیشینه دمای خنک‌کننده (د) در سناریوی تزریق راکتیویته مثبت $ ۱٫۵ در ۰٫۵ s بدون شرط خاموشی.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. ضرایب راکتیویته دمایی، خلأ و پارامترهای سینتیک قلب ۶۱

عمر نوترون آنی (μs)	کسر نوترون‌های تأخیری (pcm)	بخار (۰ تا ۴۰ درصد)	کندکننده (pcm/°C)	سوخت (pcm/°C)	وضعیت میله‌های کنترل
۵۵	۷۶۹	۴۰۰	۱۹٫۹۲	۱٫۴۰	۰٪
۵۵	۷۶۹	۶۵۰	۲۹٫۱۴	۱٫۴۶	۷۰٪



شکل ۶. درصد کسر خلأ در کانال متوسط در طول کانال خنک‌کننده.

۲.۲.۳ اثر تغییر ضرایب راکتیویته ناشی از حضور میله‌های‌کنترل بر روی پارامترهای ترموهیدرولیک

جدول ۳ ضرایب راکتیویته دمایی در موقعیت ۷۰٪ و ۰٪ را مقایسه می‌کند [۴]. نتایج مرجع ۴ نشان می‌دهد که ضرایب راکتیویته با حضور میله‌های کنترل بیش‌تر می‌شوند. با اعمال ضرایب جدید در ورودی کد PARET مجدداً سناریوی قبلی اجرا می‌شود. با توجه به شکل ۵ بخش الف در می‌یابیم که با اعمال ضرایب راکتیویته جدید، قله توان رآکتور باز هم کاهش پیدا کرد. به‌عبارتی دیگر اعمال تغییرات جدید باز منجر به بهتر شدن وضعیت ایمنی گردید. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه دمای مرکزی سوخت نیز کاهشی در حدود ۷۰٪ داشته است. نکته قابل توجه این است که اثر بازخوردهای دمایی بسیار مؤثرتر از اثر مستقیم حضور میله‌های کنترل در قلب رآکتور می‌باشد. روند کاهشی دما برای غلاف و خنک‌کننده نیز در وضعیت جدید با توجه به شکل ۵ نیز مشهود است. توجیه این روند کاهشی بیش‌تر به تغییر ضرایب راکتیویته با حضور میله‌های کنترل بر می‌گردد. با اعمال میله‌های کنترل، ضرایب راکتیویته دمایی بیش‌تر شده و بیش‌تر شدن آن‌ها باعث افزایش اثر بازخوردها شده و باعث می‌شود در شرایط حادثه توان رآکتور سریع‌تر کاهش یابد.

جدول ۴ نتایج مربوط به سه وضعیت بررسی شده در این مقاله را در قالب بیشینه پارامترهای دمایی، توان و انرژی آزاد شده در طول ۲ ثانیه نشان می‌دهد. سناریوی تحلیل شده تزریق راکتیویته مثبت ۱٫۵ $ در نیم ثانیه بدون دستور خاموشی رآکتور است. اگرچه در انتهای هر دوره کاری رآکتور میله‌های کنترل کاملاً بیرون نیستند ولی حالت ۰٪ به عنوان شرایط حدی در نظر گرفته شده است. در مورد درصد حضور ۷۰٪ میله‌های کنترل در قلب نیز وضعیت مشابهی وجود دارد. بیش‌ترین حضور میله‌های کنترل رآکتور تهران مربوط به ابتدای هر دوره کاری آن است. در شرایط راه‌اندازی با توان پایین که اثرات دمایی و نیز اثر زینان خود را نشان نداده است. در این شرایط نیز میله‌های کنترل کم‌تر از ۵۰٪ داخل هستند. بنابراین وضعیت ۷۰٪ نیز یک شرایط حدی برای داشتن بیشینه عدم تقارن در شار نوترونی و حرارتی می‌باشد. مهم‌ترین نکته‌ای که از مقایسه نتایج قابل استخراج است، رفتار متقابل پارامتر نوترونی قله توان با پارامترهای ترموهیدرولیکی در شرایط گذرا است. افزایش پارامتر قله توان منجر به کاهش پارامترهای ترموهیدرولیکی می‌گردد. عدم تقارن در توزیع شار نوترونی باعث افزایش قله توان گردیده و این موضوع باعث جوشش نقطه‌ای می‌گردد. جوشش نقطه‌ای باعث تولید خلأ گردیده و در شرایط گذرا به دلیل مؤثر بودن این پارامتر باعث کنترل توان و کاهش بیشینه دماها می‌گردد.

جدول ۴. بیشینه دماهای سوخت، غلاف، خنک‌کننده و انرژی آزاد شده در سناریوی تزریق راکتیویته مثبت

حادثه تزریق راکتیویته مثبت		قله توان [MW]	بیشینه انرژی [MJ]	قله دمای سوخت [°C]	قله دمای غلاف [°C]	قله دمای خنک کننده [°C]
۰٪		۵۰۸	۴۲/۷	۳۸۴	۲۵۸	۱۱۳
۷۰٪	N	۴۱۱	۳۸/۱	۳۶۲	۲۱۲	۷۹
	Y	۳۶۶	۲۹/۴	۳۳۴	۱۹۸	۷۷
مقادیر جدول مربوط به کانال داغ در سناریو تزریق راکتیویته ۱٫۵ دلار در نیم ثانیه با توان اولیه ۱ میلی وات بدون دستور خاموشی رآکتور تهران است						

www.SID.ir

Archive of SID

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر حضور میله‌های کنترل بر روی پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی در حالت ایستا و در توان ۵MW و در حالت گذرا با توان اولیه ۱ میلی‌وات از رآکتور تهران بررسی شد. حضور میله‌های کنترل در قلب باعث جابه‌جایی و افزایش قله توان می‌شود. بیشینه دماهای سوخت، غلاف و خنک‌کننده در شرایط ایستا متناسب با قله توان است. این موضوع باعث افزایش دما و کاهش حاشیه‌های ایمنی گردید. علی‌رغم اعمال اثر میله‌های کنترل، هیچ یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی از محدوده‌های مجاز فراتر نرفته و همگی با معیارهای ایمنی مطرح شده در بخش معیارهای ایمنی سازگاری دارند. حضور میله‌های کنترل باعث تغییر توزیع شار نوترون‌های حرارتی شده و در نتیجه توزیع شار حرارتی به‌وجود آمده از صفحات سوخت را به همان نسبت تغییر می‌دهد. در بخش گذرا حضور میله‌های کنترل باعث بهبود پارامترهای ایمنی رآکتور تهران گردید. در بخش تأثیر مستقیم اثر میله‌های کنترل، افزایش قله توان باعث افزایش بیشینه دماهای سوخت، غلاف و خنک‌کننده در نقاط قله توان می‌گردد. تزریق راکتیویته مثبت باعث می‌شود پارامترهای توان و دما با یک دوره زمانی متناسب با راکتیویته افزایش پیدا کنند. افزایش یک‌باره دماها با زمان باعث ایجاد جوشش نقطه‌ای در کانال متوسط گردیده و باعث می‌شود بازخوردهای دمایی و خلأ وارد عمل شده توان و دماهای بیشینه را در زمان‌های بعدی کاهش دهند. در بخش نهایی تحقیق اثر مستقیم به همراه اصلاح پارامترهای متأثر از حضور میله‌های کنترل مانند ضرایب راکتیویته باعث بهبود ایمنی بیش از پیش گردید. افزایش مقادیر مربوط به ضرایب راکتیویته با افزایش میزان حضور میله‌های کنترل در قلب رآکتور، باعث اعمال بازخوردهای دمایی و خلأ بیش‌تر گردیده در نتیجه بیشینه توان و دماها کاهش پیدا کرده و رآکتور در شرایط ایمن‌تری به سر خواهد برد.

مراجع

1. AEOI, *Safety Analysis Report for the Tehran Research Reactor*, Tehran-Iran, (2018).
2. A. Lashkari, *Experimental and numerical analyses of control rods effect on Tehran Research Reactor power peaking factor*, Iranian Physic Conference, Mashhad university, (1394) (in Persian).
3. A. Lashkari et al. *Neutronic analysis for Tehran research reactor mixed-core*, Pnucene, **60**, 31–37 (2012).
4. M. Torabi, et al. *Neutronic analysis of control rod effect on safety parameter s in Tehran Research Reactor*, Nuclear Engineering and Technology, **50**, (2018), doi.org/10.1016/j.net.2018.05.008.
5. INVAP, MTR_PC V. 3.0. *Neutronic, Thermal-Hydraulic and Shielding Calculations on Personal Computers*. Nuclear Engineering Division, INVAP, Bariloche. (2006)..
6. C.J. Taubman, J.H.L., WIMS-D4 Code, *A Genera description of the Lattice Code WIMS*, United Kingdom Atomic Energy Authorit.
7. E. Villarino, CITVAP v3. 1 *Improved version of CITATION II*. MTR_PC v2, (2001).
8. INVAP, P.A. Termic V4.1, *A Program for the thermal-Hydraulic Analysis of A MTR Core*, In Forced Convection. (2003).
9. E., P.A.-I.S., CAUVAP v3.60, *A computer program for flow distribution and pressure drop calculation in a MTR type core*. (2003).
10. A.E. Bergles, W.M. Rohsenow, *Forced-Convection Surface Boiling Heat Transfer and Burnout in Tubes of Small Diameter*, DSR Report No. 8767-21, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, (1962).
11. IAEA-TECDOC-233, *Research Reactor Core Conversion from the use of Highly Enriched Uranium to the use of Low Enriched Uranium*, Appendix A 'U.S. Generic Enrichment Reduction calculations for plate type and rod type reactors', ANL (USA) (1980).
12. W.L Woodruff, *A kinetics and thermal-hydraulics capability for the analysis of research reactors*, Nuclear Technology, **64**, 196–206, (1984).
13. IAEA, *Safety analysis for research reactors*, Safety Reports Series No. **55**, IAEA, Vienna (2008).

www.SID.ir