

نشریه تابش و فناوری هسته ای، دوره ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶

محاسبه و آنالیز پارامترهای نوترونی و سیستمی در راکتور نسل جدید ماژولار NuScale

مصطفی حسن زاده^{۱*}، مسعود امین مظفری^۱

^۱ استادیار، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۸)

چکیده

انجام محاسبات نوترونی مبنای آنالیز پارامترهای مختلفی همچون ترموهیدرولیک، ایمنی و کنترل راکتورهای هسته ای است، لذا در این تحقیق پارامترهای نوترونی و سیستمی شامل ضریب تکثیر موثر (k_{eff})، مقادیر شار نوترون، توزیع شعاعی توان، فاکتورهای پیک توان، کسر موثر نوترون های تأخیری و طول عمر نوترون های آبی و همچنین پارامترهایی مانند توزیع جرمی سموم نوترونی و پاره های شکافت، میزان تغییرات جرمی عناصر شکافت پذیر مهم مانند ^{235}U و ^{239}Pu ، برحسب برناپ توسط کد MCNPX برای راکتور کوچک ماژولار NuScale محاسبه شده است. این راکتور یکی از مهمترین انواع راکتورهای کوچک ماژولار است که مقدار غلظت اسید بوریک در خنک کننده آن برای ایجاد شرایط بحرانی $1/8 \text{ g/Kg}$ بدست آمده است. همچنین بدون اسید بوریک، مقادیر متوسط شار نوترون های حرارتی، فوق حرارتی و سریع به ترتیب $1/15 \times 10^{13}$ ، $8/79 \times 10^{13}$ و $3/67 \times 10^{13}$ و با حضور آن به ترتیب $1/43 \times 10^{13}$ ، $7/46 \times 10^{13}$ و $3/69 \times 10^{13}$ بدست آمده است (واحد همه اعداد $\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ است). علاوه بر این، مقادیر پارامترهای نوترونی و سیستمی با حضور اسید بوریک کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد که در ابتدای سیکل به دلیل تولید زینان و وجود سم گادولینیوم مقدار ضریب تکثیر موثر کاهش یافته و در ادامه با مصرف سموم نوترونی و تولید پاره های شکافت افزایش می یابد. در نهایت می توان گفت که استفاده از سم گادولینیوم موجب افزایش ضریب تکثیر موثر در طول سیکل می گردد.

واژه های کلیدی: پارامترهای نوترونی و سیستمی، اسید بوریک، برناپ، کد MCNPX، راکتور NuScale

تهران، تهران پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، کد پستی: ۱۳۳۹۱۴۱۵۵.

پست الکترونیکی: mhasanzadeh@aeoi.org.ir و m_hassanzadeh1354@yahoo.com

۱. مقدمه

این تحقیق، پارامترهای نوترونی و سینتیکی راکتور هسته‌ای NuScale با قدرت حدود ۵۰ MWe با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده است [۴].

این پارامترهای نوترونی و سینتیکی شامل: ضریب تکثیر موثر، شار نوترون، توزیع توان شعاعی، فاکتورهای پیک توان، کسر موثر نوترون‌های تأخیری و طول عمر نوترون‌های آنی می‌باشد که در دو حالت با حضور اسید بوریک و بدون آن محاسبه شده است. همچنین برخی از این پارامترها شامل ضریب تکثیر موثر، توزیع جرمی سموم نوترونی مانند گادولینیوم، زینان، ساماریوم، توزیع جرمی پاره‌های شکافت، میزان تغییرات جرمی برخی از عناصر شکافت پذیر مهم مانند ^{235}U و ^{239}Pu برحسب مصرف سوخت (برناپ) نیز محاسبه شده است.

۲. مواد و روش کار

۲.۱. طراحی و شبیه سازی هندسه و اجزای قلب راکتور

طرح اولیه راکتور NuScale با نام MASLWR^2 در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ میلادی توسط تیم‌های تحقیقاتی Idaho National Laboratory و Oregon State University انجام گرفته است. این راکتور که در حال حاضر در کشور آمریکا در دست طراحی است، در سال ۲۰۰۷ به صورت یک راکتور SMR طراحی شد که هر واحد از این راکتور، یک سیستم یکپارچه ساده شده دارای توان ۵۰ MWe می‌باشد. در این راکتور از سیستم گردش طبیعی برای خنک سازی مدار اول استفاده می‌شود. قلب راکتور شامل ۳۷ مجتمع سوخت یکپارچه با آرایه 17×17 می‌باشد. همچنین ۱۶ مجتمع سوخت حاوی میله‌های

امروزه به دلیل قیمت بالای راکتورهای بزرگ و همچنین به دلیل نیاز به شبکه برق کوچک تر، تمایل به ساخت راکتورهای کوچک ماژولار (SMR^1) با توان کمتر از ۳۰۰ MWe افزایش یافته است. راکتورهای کوچک ماژولار نسل جدیدی از راکتورهای هسته‌ای پیشرفته هستند که به دلیل رشد تکنولوژی اکثر کشورها و به خاطر تولید انرژی مقرون به صرفه، اندازه کوچک آن‌ها و هزینه نسبتاً پایین، علاقمندی بسیاری در برخی از کشورها جهت ساخت آنها ایجاد شده است. این نوع راکتور طرحی ابتکاری است که بر اساس تجارب بدست آمده از ۵۰ سال کار عملی در راکتورهای PWR آب سبک حاصل شده است و از ویژگیهای آن کاهش پیچیدگی، بهبود ایمنی و افزایش قابلیت عملی است. هدف اصلی از طراحی و ساخت راکتورهای کوچک ماژولار تولید انرژی، تولید هیدروژن، آب شرب، تولید حرارت، نمک زدایی آب دریاها، تولید نیروی پیشران زیر دریایی‌ها و... است [۱]. به عنوان مثال، نمونه‌هایی از این راکتورهای کوچک شامل راکتور CAREM در آرژانتین، راکتور SMART در کره جنوبی، راکتور ACP-100 در چین، راکتورهای mPower، NuScale و IRIS در آمریکا، راکتورهای RITM VKR، KLT-40S، ABV، SUBR و VBER-300 در روسیه، راکتور Flexblue در فرانسه، راکتور FBMR در برزیل، راکتور PBMR در آفریقای جنوبی، راکتور PFPWR در ژاپن و راکتور BARC در هند می‌باشند [۲، ۳].

انجام محاسبات نوترونی از این جهت که مبنای آنالیز و طراحی سیستمهای دیگری مانند ترموهیدرولیک، ایمنی، حفاظ سازی و ... می‌باشد، بسیار حائز اهمیت است. به این منظور در

^۱ Small Modular Reactor^۲ Multi-Application Small Light Water Reactor

جدول ۱. پارامترهای اصلی راکتور NuScale

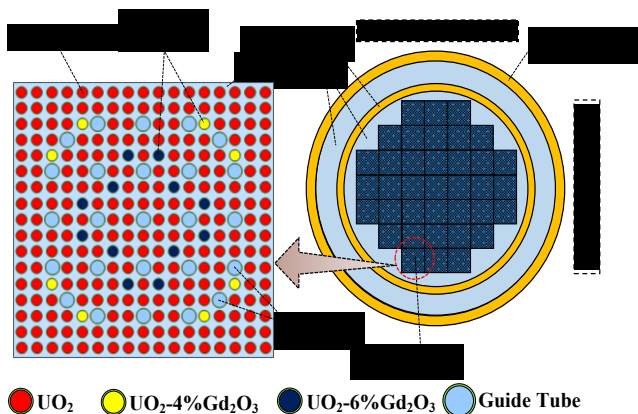
Parameters	Values
Reactor type	Integral PWR
Thermal capacity	160 MW(th)
Electrical capacity	50 MW(e)
Fuel enrichment and rod types	UO ₂ , U ²³⁵ w/o= 3.25
	UO ₂ -4%Gd ₂ O ₃ , U ²³⁵ w/o= 3.12
	UO ₂ -6%Gd ₂ O ₃ , U ²³⁵ w/o= 3.06
Coolant	Light Water
Capacity factor	> 95 %
Containment dimensions	~ 23m × 4.6m
Moderator	Light Water
Fuel cycle	24 Months
Design life	60 Years
Rod outside radius	0.475 cm
Pellet outside radius	0.4102 cm
Clad thickness	0.05334 cm
Active height	200 cm

کنترل و محلول اسید بوریک درون خنک کننده وظیفه کنترل راکتیویته را در این راکتور بر عهده دارند. محفظه فشار راکتور در داخل یک پوشش ایمنی دیگر از جنس فولاد ضدزنگ قرار دارد که این پوشش ایمنی بطور کامل در داخل استخر راکتور فرو رفته است. نمای شماتیک از قلب راکتور NuScale به همراه مجتمع سوخت شبیه سازی شده توسط کد MCNPX در شکل ۱ و پارامترهای اصلی این راکتور در جدول ۱ ارائه شده است [۶،۵].

مجتمع سوخت در این راکتور مشابه مجتمع سوخت استاندارد ۱۷×۱۷ راکتورهای PWR بوده و دارای ۲۶۴ میله سوخت، ۲۴ لوله هادی برای میله‌های کنترل و یک لوله مرکزی برای تجهیزات اندازه‌گیری است، با این تفاوت که ارتفاع آن به نصف یعنی ۲ متر کاهش یافته است. هندسه سوخت این راکتور میله‌ای با ابعاد ذکر شده در جدول ۱ مشابه مجتمع سوخت استاندارد ۱۷×۱۷ راکتورهای PWR است.

سوخت این راکتور از جنس UO₂ است که در ۲۰ میله منتخب با اکسید گادولینیوم یا همان گادولینیا (Gd₂O₃) به عنوان سم سوختی بطور همگن ترکیب شده است. در جدول ۱ نوع، تعداد و غنای سوخت بکار گرفته شده در هر مجتمع سوخت و در شکل ۱ نحوه چیدمان میله‌های سوخت در یک مجتمع نشان داده شده است. لازم به ذکر است که غنای میله‌های سوخت کمتر از ۴/۹۵ درصد است که از محدودیت اعلام شده توسط نظام ایمنی ایالات متحده برای تولیدکنندگان سوخت هسته‌ای کمتر است [۷-۹].

خنک کننده و کند کننده این راکتور آب سبک بوده و از اسید بوریک محلول در آب جهت کنترل راکتیویته استفاده شده است. غلظت اسید بوریک در خنک کننده برای حالت بحرانی ۱/۸ گرم محاسبه گردیده است.



شکل ۱. قلب شبیه سازی شده راکتور NuScale (سمت راست) به همراه چیدمان یک مجتمع سوخت آن (سمت چپ) با استفاده از کد MCNPX

همه ۳۷ مجتمع قلب دارای ۲۴ عدد لوله هادی (شکل ۱) هستند که از این تعداد، ۱۶ مجتمع حاوی میله‌های کنترل می‌باشد و در بقیه مجتمع‌ها، خنک کننده در داخل لوله‌های هادی قرار دارد. از این ۱۶ مجتمع حاوی میله‌های کنترل، گروه اول شامل ۴

جدول ۲. کمترین، بیشترین و متوسط شار نوترون برای سه گروه انرژی در قلب با حضور اسید بوریک و بدون آن

Neutron energy groups						
Flux Value s (#/cm ² .sec)	without boric acid			with boric acid		
	Thermal	Epithermal	Fast	Thermal	Epithermal	Fast
Max.	3.59×10^{13}	1.75×10^{14}	7.30×10^{13}	3.39×10^{13}	1.76×10^{14}	7.35×10^{13}
Min.	7.84×10^{12}	3.82×10^{13}	1.58×10^{13}	7.43×10^{12}	3.85×10^{13}	1.59×10^{13}
Ave.	1.85×10^{13}	8.79×10^{13}	3.67×10^{13}	1.43×10^{13}	7.46×10^{13}	3.69×10^{13}

جدول ۳. فاکتورهای پیک توان قلب NuScale

Neutronic Parameters	Reference [3]	Values MCNPX
Effective Multiplication Factor	1.0004	0.99994
Axial Power Peaking Factor	-	1.44
Radial Power Peaking Factor	-	1.99
Total Power Peaking Factor	-	2.86

همچنین بیشترین فاکتور پیک توان شعاعی، محوری و کل به ترتیب مقادیر ۱/۹۹، ۱/۴۴ و ۲/۸۶ بدست آمده است. علاوه بر این، توزیع فاکتور شعاعی پیک توان برای همه میله‌های سوخت در داغ‌ترین مجتمع سوخت (مجتمع D4) در شکل (۲) ارائه شده است.

با تحلیل نتیجه محاسبات ارائه شده در شکل (۲) نکات مهمی حاصل می‌شود که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

- ۱- در میله‌های حاوی سم سوختنی گادولینیوم مقدار فاکتور پیک توان به مراتب کمتر از میله‌های حاوی سوخت اکسید اورانیوم است (در حدود ۳ تا ۴ برابر).
- ۲- در بین میله‌های حاوی سم سوختنی، میله‌هایی که دارای مقدار گادولینیوم بیشتری هستند ($\text{UO}_2\text{-6\%Gd}_2\text{O}_3$)، نسبت به میله‌های با گادولینیوم کمتر ($\text{UO}_2\text{-4\%Gd}_2\text{O}_3$) فاکتور پیک توان پایین‌تری دارند. نکته جالب اینکه به دلیل تقارن کامل در چیدمان میله‌ها، همه میله‌هایی که در جایگاه متقارنی نسبت به

مجتمع در طی کار عادی راکتور جهت تنظیم و مسطح کردن شار کلی نوترون و نیز کنترل توان استفاده می‌شوند و در گروه دوم میله‌های کنترل موجود در ۱۲ مجتمع دیگر جهت خاموشی راکتور بکار می‌روند. ماده جاذب این میله‌ها از جنس نقره-ایندیوم-کادمیوم است که کل طول قلب را پوشش می‌دهد. جنس غلاف میله‌های کنترل نیز فولاد ضد زنگ است که آنها را از خنک‌کننده راکتور جدا می‌سازد. جنس ماده جاذب در هر دو گروه میله‌های کنترل یکسان است [۱۱، ۱۰].

۳. نتایج

۳.۱. محاسبه پارامترهای نوترونی

قلب راکتور NuScale به همراه محفظه فشار راکتور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با جزئیات کامل توسط کد MCNPX شبیه سازی گردید. در این تحقیق مقدار توزیع شار نوترون در سه گروه انرژی برای سه ناحیه حرارتی، فوق حرارتی و سریع محاسبه شده است. همچنین مقادیر بیشترین شار نوترون مربوط به مجتمع سوخت مرکزی (یعنی D4)، کمترین و متوسط مقادیر شار نوترون در هر سه ناحیه حرارتی، فوق حرارتی و سریع در جدول (۲) ذکر شده است.

لازم به ذکر است در این تحقیق این محاسبات برای دو حالت خنک کننده با اسید بوریک و بدون آن انجام شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، میزان شار نوترون برای سه گروه انرژی در حضور اسید بوریک کاهش یافته است.

در ادامه پارامتر ضریب تکثیر موثر قلب و همچنین بیشینه فاکتور پیک توان شعاعی، محوری و کل قلب با استفاده از کد MCNPX محاسبه شده که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق با این جدول، مقدار ضریب تکثیر موثر محاسبه شده در شرایطی که خنک کننده حاوی اسید بوریک است، در توافق با مرجع می‌باشد.

۲.۳. محاسبه پارامترهای سینتیکی

نوترون های حاصل از شکافت به دو گروه آنی و تأخیری تقسیم می شوند. اگرچه سهم خیلی کمی از کل نوترون های حاصل از شکافت به نوترون های تأخیری اختصاص دارد. ولی نقش آنها در کنترل راکتور بسیار مهم و اساسی است. کسر موثر نوترون های تأخیری با برقراری همیشگی شرط $\rho \leq \beta_{eff}$ تعیین کننده مقدار حداکثر راکتیویته ای است که می توان به راکتور اعمال کرد تا به وضعیت بحرانی آنی نرسد.

از طرفی در حالت های گذرای سریع و همچنین در وضعیت بحرانی آنی، رفتار راکتور به طول عمر نوترون های آنی وابسته است. طول عمر نوترون های آنی در راکتورهای مختلف با توجه به پارامترهای مختلف از قبیل کند کننده، خنک کننده، بازتابنده و اندازه قلب تعیین می شود. با توجه به این که کد MCNPX فقط قادر به محاسبه طول عمر نوترون های آنی است، لذا در این تحقیق، پارامتر طول عمر نوترون آنی بدون حضور اسید بوریک و در حضور آن مقادیر $26/09 \mu s$ و $20/40 \mu s$ بدست آمده است.

برای محاسبه کسر موثر نوترون های تأخیری از تکنیک های مختلف محاسباتی استفاده می شود. اما در این گزارش، کسر موثر نوترون های تأخیری، β_{eff} توسط کد MCNPX و از روش "prompt method" شده است. طبق این روش عبارت کسر موثر نوترون تأخیری به صورت زیر بیان می شود [۱۲-۱۳]:

$$\beta_{eff} = 1 - \frac{K_p}{K_{eff}} \quad (1)$$

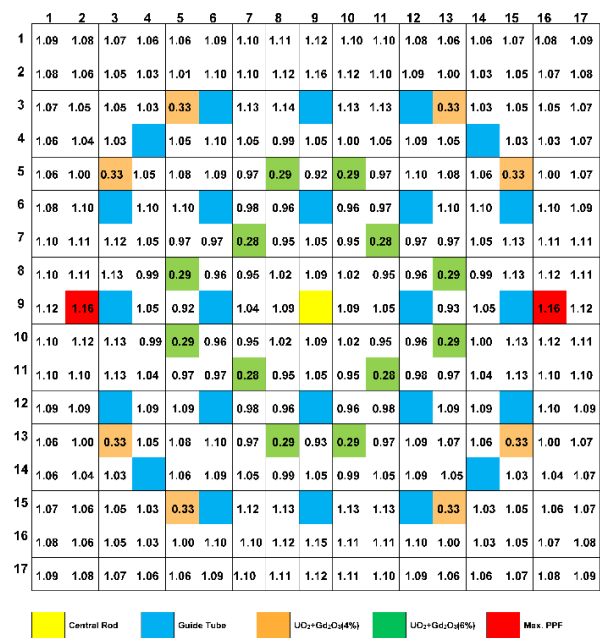
که در آن K_p ضریب تکثیر موثر نوترون های آنی و K_{eff} ضریب تکثیر موثر کل می باشد.

برای محاسبه این کمیت ها در این کد نیازمند به کارت های KCODE، TOTNU و PHYS هستیم. در محاسبات بحرانی، اگر کارت TOTNU در برنامه آورده نشود و یا اینکه این کارت در برنامه بدون ورودی باشد، در این صورت مقدار میانگین نوترون های آنی و تأخیری و در نتیجه ضریب تکثیر موثر کل

مرکز مجتمع سوخت قرار گرفته اند، توان یکسانی تولید می کنند.

۳- همانطور که انتظار می رفت، میله های سوختی که در مجاورت میله های حاوی سم سوختنی قرار دارند، توان کمتری تولید می کنند. از این رو در میله های واقع در سطر و ستون ۱ و ۲ و نیز ۱۶ و ۱۷، هر چه به سمت لبه مجتمع سوخت نزدیک می شویم، توان تولیدی افزایش می یابد.

۴- داغ ترین میله سوخت، میله سوخت حاوی اکسید اورانیوم است که در حاشیه مجتمع سوخت و دور از مرکز قرار دارد. با توجه به اینکه مقدار فاکتور پیک توان این میله $1/1627$ بوده و کل توان تولیدی در این مجتمع سوخت 860.7 kW است، مقدار توان تولیدی توسط این میله برابر $37/88 \text{ kW} = 860.7 \div 26 = 37/88 \text{ kW}$ خواهد بود.



شکل ۲. توزیع فاکتور پیک توان شعاعی در داغ ترین مجتمع

سوخت (مجتمع مرکزی D4)

بدست می آید. ولی اگر کارت TOTNU با ورودی NO در برنامه اعمال شود، در این صورت مقدار میانگین نوترونهاي آني و در نتیجه ضريب تکثير موثر نوترونهاي آني محاسبه مي شود. نتايج بدست آمده از محاسبات کد MCNPX براي حالي که خنک کننده با اسيد بورىک و بدون آن باشد، در جدول ۴ ارائه شده است.

۳.۳. محاسبات مصرف سوخت (برناپ)

پارامتر ميزان مصرف سوخت و يا برناپ يکي از مهمترين پارامترهاي نوتروني در فيزيک راکتور، مي باشد. اين پارامتر در ايمني و در طراحي قلب راکتورها داراي اهميت ويژه اي است. همان طور که مي دانيم با افزايش زمان، ميزان مصرف سوخت در قلب يک راکتور افزايش مي يابد، در نتيجه مواد جديدي در قلب توليد خواهند شد که اثر مهمي روي پارامترهاي نوتروني و ديناميکي قلب دارند [۱۴]. بنابر اين بايستي اين پارامترها برحسب زمان در قلب يک راکتور محاسبه گردند. لذا در اين تحقيق از کد MCNPX نسخه ۲/۶ آن جهت محاسبه ميزان مصرف سوخت استفاده شده است. الگوريتم محاسبه مصرف سوخت توسط کد CINDER90 که نسخه ارتقاء يافته کد CINDER مي باشد و در داخل کد MCNPX قرار داده شده است، انجام مي گيرد. کتابخانه داده هاي اين کد براي ۳۴۵۶ ايزوتوپ طراحي شده است که شامل واپاشي ايزوتوپ هاي محصول شکافت، بهره محصولات شکافت و مقادير واپاشي ايزوتوپ هاي آکتيوئيد هاي کم مقدار و غيره مي باشد. همچنين در اين کد، سطح مقطع مواد براي ۶۳ گروه انرژي در نظر گرفته شده است [۴].

در اين تحقيق پارامترهاي نوتروني و سبتيکي قلب راکتور NuScale برحسب مصرف سوخت (برناپ) با استفاده از کد MCNPX با حضور اسيد بورىک و بدون آن بررسي و محاسبه شده است. اين پارامترهاي نوتروني شامل: ضريب تکثير موثر،

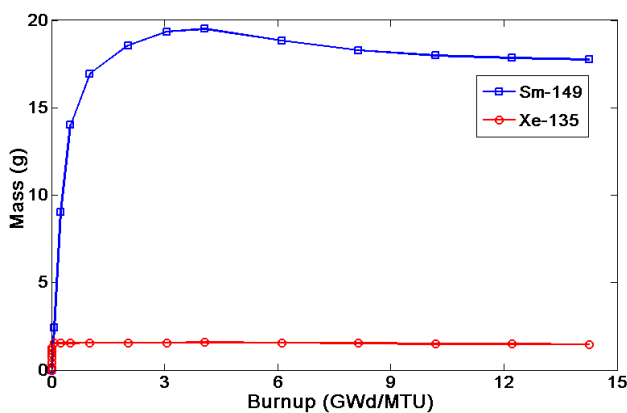
توزيع جرمي سموم نوتروني مانند گادولينيوم، زينان، ساماريوم و غيره، توزيع جرمي پاره هاي شکافت و ميزان تغييرات جرمي برخي از عناصر شکافت پذير مهم مانند ^{235}U و ^{239}Pu برحسب برناپ مي باشند. لازم به ذکر است که تمام محاسبات اين پارامترهاي نوتروني با طول سيکل ۲۷ ماه انجام شده است. سموم نوتروني شامل: بور (B)، گادولينيوم (Gd)، اربيوم (Er) و ديسپروزيوم (Dy) مي باشند. در حال حاضر، گادولينيوم رايج ترين سم نوتروني در راکتورهاي تجاري است. گادولينيوم طبيعي حاوي ايزوتوپ هاي ^{152}Gd ، ^{154}Gd ، ^{155}Gd ، ^{156}Gd ، ^{157}Gd ، ^{158}Gd و ^{160}Gd به ترتيب با درصد فراواني 0.2% ، 2.18% ، 14.8% ، 20.47% ، 15.65% ، 24.84% و 21.86% است که از بين آنها ايزوتوپ هاي ^{155}Gd و ^{157}Gd داراي سطح مقطع جذب نوترون حرارتي فوق العاده اي به ترتيب در حدود 61000 barn و 254000 barn مي باشند. اين بدین معنی است که گادولينيوم حتی با غلظت بسيار کم مي تواند بطور محسوسي ضريب تکثير را کاهش دهد. با وجود اين، Gd معمولاً نه به صورت روکش بلکه به صورت توزيع فضايي در حجم قرص سوخت توزيع مي شود تا امکان خودحفاظتي فضايي نيز فراهم گردد. شکل ۳ ميزان تغييرات ضريب تکثير موثر برحسب زمان را براي يک سيکل با حضور اسيد بورىک و با وجود سم نوتروني گادولينيوم در ميله هاي سوخت نشان مي دهد.

جدول ۴. پارامترهاي کسر موثر نوترون هاي تأخيري و طول عمر

نوترون هاي آني با حضور اسيد بورىک و بدون آن

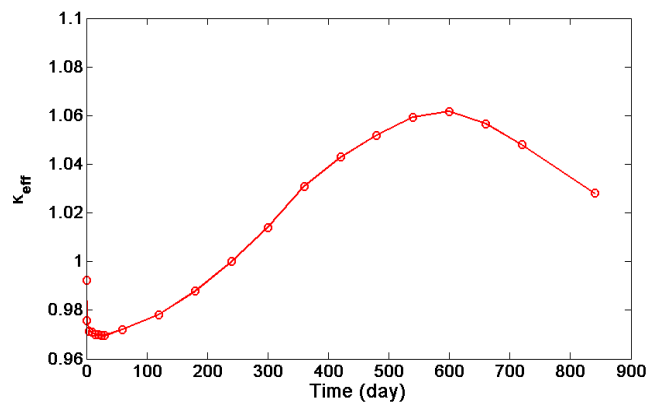
Parameter	Without acid boric	With acid boric
K	1.06231 ± 0.00007	0.99994 ± 0.00007
K_p	1.05513 ± 0.00007	0.99335 ± 0.00007
$\beta_{eff} (\text{pcm})$	675.9 ± 0.000132	659.0 ± 0.00014
$L_p (\mu\text{s})$	26.09 ± 0.03	20.40 ± 0.03

شکل (۵) میزان تغییرات سموم نوترونی شامل زینان و ساماریوم برحسب برناپ را نشان می‌دهد. همان گونه که از این شکل واضح است، مقدار این سموم نوترونی با افزایش مصرف سوخت در ابتدای سیکل به دلیل تولید این سموم با شیب تند افزایش، اما بعد از آن، با مصرف آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که تقریباً بعد از یک روز (معادل ۳ GWd/MTU) مقدار زینان به حد اشباع خود می‌رسد.



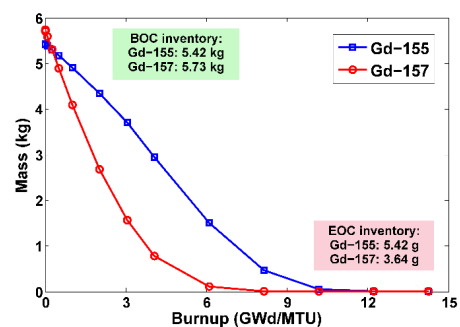
شکل ۵. تغییرات جرمی سموم نوترونی شامل زینان و ساماریوم برحسب برناپ

شکل (۶) توزیع جرمی برخی از عناصر پاره‌های شکافت و عناصر شکافت پذیر مهم شامل ایزوتوپ‌های اورانیوم و پلوتونیم برحسب برناپ را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مصرف سوخت مقدار ایزوتوپ‌های ^{238}U و ^{235}U کاهش، ولی مقدار ایزوتوپ‌های پلوتونیم و دیگر پاره‌های شکافت به دلیل تولید ایزوتوپ‌های جدید افزایش می‌یابد.



شکل ۳. تغییرات ضریب تکثیر موثر برحسب زمان با حضور اسید بوریک

همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در ابتدای سیکل به دلیل تولید زینان (در طی روز اول) و سپس به خاطر جذب بالای سم گادولینیوم، مقدار ضریب تکثیر موثر به شدت کاهش یافته و در ادامه با مصرف این سم نوترونی مقدار این پارامتر افزایش می‌یابد. در انتهای سیکل با مصرف شدن کامل گادولینیوم و همچنین به دلیل مصرف ایزوتوپ‌های اورانیوم و تولید پاره‌های شکافت مهمی مانند پلوتونیم، زینان و ساماریوم مقدار K_{eff} کاهش خواهد یافت. شکل ۴ میزان تغییرات ایزوتوپ‌های ^{155}Gd و ^{157}Gd برحسب برناپ را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار مجموع ایزوتوپ‌های ^{155}Gd و ^{157}Gd در ابتدای سیکل ۱۱/۱۵ کیلوگرم بوده که پس از انتهای سیکل به مقدار ۷/۸ گرم رسیده است. لذا نتایج این شکل نشان می‌دهد که با افزایش مصرف سوخت به دلیل مصرف گادولینیوم، مقدار آن کاهش می‌یابد.



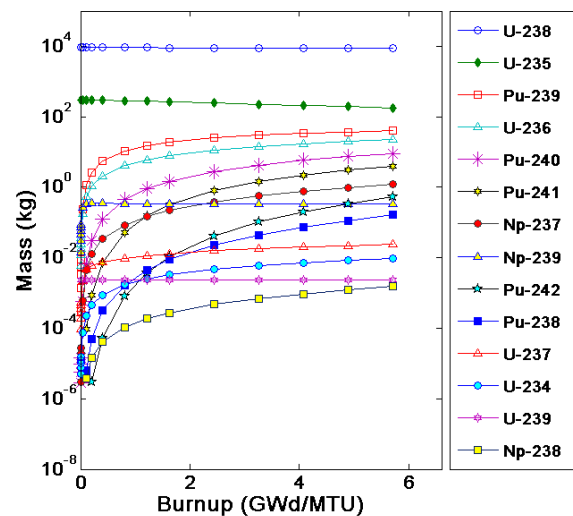
شکل ۴. میزان تغییرات ایزوتوپ‌های ^{155}Gd و ^{157}Gd برحسب برناپ

بنابراین از این جدول می توان نتیجه گرفت که استفاده از اسید بوریک موجب کاهش مصرف مواد شکافت پذیر شده است.

جدول ۶. مقادیر ایزوتوپ های ^{238}U ، ^{235}U و ^{239}Pu برحسب

برناپ در ابتدا و انتهای سیکل با حضور اسید بوریک و بدون آن

Isotopes	BOC inventory (kg)	No boric acid		With boric acid	
		EOC inventory (kg)	Δm (kg)	EOC inventory (kg)	Δm (kg)
92235	3.05E+05	1.81E+05	-124.5	1.96E+05	-109.1
92238	9.12E+06	9.03E+06	-93	9.04E+06	-82
94239	-	3.967E+04	+39.67	3.90E+04	+38.95
Total	9429	9288	-141	9309	-120



شکل ۶. توزیع جرمی برخی از پاره های شکافت و تولید عناصر

شکافت پذیر جدید برحسب برناپ

۴. بحث و نتیجه گیری

به منظور آنالیز و طراحی سیستم هایی چون ترموهیدرولیک، ایمنی، حفاظ سازی و ... انجام محاسبات نوترونی لازم و اجتناب ناپذیر است. به این منظور در این محاسبات پس از محاسبه میزان اسید بوریک برای ایجاد شرایط بحرانی ($1/8 \text{ g/Kg}$)، پارامترهای نوترونی شامل: ضریب تکثیر موثر، شار نوترون، توزیع شعاعی توان، فاکتورهای پیک توان و همچنین پارامترهای سینتیکی شامل: کسر موثر نوترون های تأخیری و طول عمر نوترون های آنی در دو شرایط خنک کننده با حضور اسید بوریک و بدون آن و به همراه مصرف سوخت (برناپ) توسط کد MCNPX برای راکتور کوچک ماژولار NuScale محاسبه و آنالیز شده است. محاسبات نشان می دهد که بیشترین مقدار شار در سه ناحیه حرارتی، فوق حرارتی و سریع در مرکز قلب یعنی مجتمع سوخت D4 است. همچنین بیشترین مقادیر پیک توان شعاعی، محوری و کل قلب به ترتیب مقادیر $1/99$ ، $1/44$ و $2/86$ بدست آمد. برای پارامتر سینتیکی کسر موثر نوترون های تأخیری مقدار $10^{-3} \times 6/75$ بدست آمده است. علاوه بر این در این تحقیق، پارامتر طول عمر نوترون های آنی بدون حضور اسید بوریک و در حضور آن

جدول (۵) مقادیر ایزوتوپهای ^{235}U ، ^{238}U و ^{239}Pu را بر حسب برناپ در ابتدا و انتهای سیکل نشان می دهد. در انتهای سیکل، مقادیر ایزوتوپهای ^{235}U و ^{238}U به ترتیب تقریباً ۴۱٪ و ۱٪ کاهش یافته است، ولی مقدار ^{239}Pu تقریباً ۴۰ کیلوگرم در انتهای سیکل تولید شده است.

جدول ۵. مقادیر ایزوتوپ های ^{238}U ، ^{235}U و ^{239}Pu برحسب

برناپ در ابتدا و انتهای سیکل

Isotopes	Inventory (kg)		
	BOC	EOC	$\Delta m/m\%$
U-238	9123.0	9030.0	-1.02
U-235	305.3	180.8	-40.78
Pu-239	0.0	39.67	-

جدول (۶) مقادیر ایزوتوپ های ^{235}U ، ^{238}U و ^{239}Pu برحسب

برناپ در ابتدا و انتهای سیکل با حضور اسید بوریک و بدون آن نشان می دهد. بر طبق نتایج این جدول، مجموع کل ایزوتوپ های ^{238}U و ^{235}U در ابتدا و انتهای سیکل با حضور اسید بوریک و بدون آن به ترتیب ۱۲۰ و ۱۴۱ کیلوگرم کاهش یافته است.

- [12] Snoj, L. et al., 2008. Monte Carlo Calculation of Kinetic Parameters for the TRIGA Mark II Research Reactor. Nuclear Energy for New Europe.
- [13] Talamo, A. and Gohar, Y., 2010. Deterministic and Monte Carlo Modeling and Analyses of Yalina-Thermal Subcritical Assembly, Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory.
- [14] Muhammad, F., 2010. Kinetic Parameters of Low Enriched Uranium Fuelled Material Test Research Reactor at End-of-Life. *Ann. Nuc. Energy* 37, 1411-1414.

مقادیر $26/09 \mu s$ و $20/40 \mu s$ محاسبه شده است. همچنین نتایج این تحقیق بیانگر آن است که در ابتدای سیکل به دلیل تولید زینان و همچنین جذب بالای سم گادولینیوم مقدار ضریب تکثیر موثر کاهش یافته و سپس با مصرف سموم نوترونی و ایزوتوپ های اورانیوم و تولید پاره های شکافت مقدار این پارامتر در ادامه افزایش می یابد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که حضور سم سوختنی گادولینیوم در این راکتور موجب افزایش ضریب تکثیر مؤثر در طول سیکل می گردد که این یکی از مزایای مهم این نوع سم در مقایسه با سایر سموم سوختنی محسوب می شود. در نهایت می توان گفت که استفاده از اسید بوریک موجب کاهش مصرف مواد شکافت پذیر شده است.

مراجع

- [1] IAEA, Status of Small Reactor Designs without Onsite Refueling, TECDOC-1536, Vienna, 2007.
- [2] Ingersoll, D. T., Houghton, Z. J., Bromm, R., Desportes, C., NuScale Small Modular Reactor for Co-Generation of Electricity and Water, 2014.
- [3] Mario D. Carelli, Daniel T. Ingersoll, Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, *Woodhead Publishing Series in Energy*: Number 64, 2015.
- [4] Denise, P. B.. MCNPX User's Manual Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-07-1473, 2008.
- [5] NuScale Plant Design Overview, NuScale Power, LLC, Revision 0, NP-ER-0000-1198, 2012.
- [6] NuScale Plant Design Overview, NuScale Power, LLC, Revision 0, NP-ER-0000-1198, 2014.
- [7] <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/26.NuScale.pdf>.
- [8] NuScale Codes and Methods Framework, Description Report, NuScale Power, LLC, NP-TR-0812-1682-NP, 2013.
- [9] Official website of NuScale reactor, NuScale Power, LLC, 2015.
- [10] Critical Heat Flux Test Program, Technical Report, NuScale Power, LLC, TR-1113-5374-NP, 2014.
- [11] NuScale Plant Design Overview, NuScale Power, LLC, Revision 0, NP-ER-0000-1198, 2013.

Calculation and Analysis of Neutronic and Kinetic Parameters in NuScale Small Modular Reactor

M. Hasanzadeh* , M. A. Mzafari

Assistant Professor, Reactor and Nuclear Safety Institute, Nuclear Science and Technology Institute, Atomic Energy Organization, Tehran, Tehran, Iran

** Corresponding author's E-mail: mhasanzadeh@aroi.org.ir, mhasanzadeh1354@yahoo.com*

(Received: 2016/11/22- Accepted: 2017/03/08)

ABSTRACT

Since the neutronic calculation of a nuclear reactor is a basis for designing other parameters such as thermal hydraulic, safety, etc., thus, in this work the neutronic and kinetic parameters of the next generation SMR reactor called NuScale have been calculated and analyzed. These parameters include the effective multiplication factor (k_{eff}), neutron flux, axial and radial power peaking factor, effective delayed neutron fraction and prompt neutron lifetime. Moreover, the burn up calculation is performed to find the mass changes in fissile isotopes such as ^{235}U and ^{239}Pu , burnable poison material and some of important fission fragments. The acid boric concentration in the coolant has been found about 1.8 g/kg in the criticality condition. Also, the average values of thermal, epithermal and fast neutron fluxes are obtained about 1.85×10^{13} , 8.79×10^{13} and $3.67 \times 10^{13} \frac{n}{cm^2.s}$, respectively. In addition, the values of neutronic and kinetic parameters are decreased in the present of acid boric. The results show that in the beginning of cycle (BOC) the k_{eff} value is decreased suddenly due to Xe production and then the neutron absorption by Gd burnable poison. Afterwards, this parameter is increased due to the production of fission fragments and the spatial self-shielding property of Gd fuel rods. Finally, we can see that Gd burnable poison causes increasing of the value of k_{eff} parameter in during the cycle.

Keywords: *neutronic and kinetic parameters, acid boric, burnup, MCNPX code, NuScale reactor.*