

تأثیر استفاده از سوخت با غنای بالای ۱۰ درصد بر طیف انرژی نوترون و سطوح مقاطع جذب

فاطمه دهقانی*^۱، محمدرضا عباسی^۱، مجید حسینی^۱

۱. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه راکتور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۱۶

مکیده

یکی از موضوعات مهم در طراحی راکتور، توزیع انرژی نوترون ها یا طیف انرژی نوترون در قلب راکتور می باشد، راکتورهای هسته ای بسته به نوع کاربرد، دارای سوخت هایی با غنای متفاوت می باشند. راکتورهای پیشران از جمله راکتورهایی هستند که باید پس از خاموشی دارای پیک زینان کمتری باشند تا توانایی روشن سازی راکتور در مدت زمان اندکی پس از خاموشی را فراهم باشد. به همین دلیل تعیین غنای صحیح سوخت ملزم به بررسی تاثیرات افزایش غنا بر طیف انرژی نوترون ها و سطوح مقاطع جذب می باشد. در این تحقیق ضمن صحت سنجی کتابخانه های کد WIMS جهت استفاده در سوخت هایی با غنای بالای ۱۰ درصد، به بررسی تأثیر استفاده از سوخت با غنای بالای ۱۰ درصد بر طیف انرژی نوترون و سطوح مقاطع جذب بخصوص سطح مقطع جذب حرارتی زینان پرداخته شده است. بررسی نتایج نشان داد که افزایش غنا منجر به کاهش سطح مقطع جذب زینان و در نتیجه ی آن کاهش پیک زینان پس از خاموشی می شود.

واژه های کلیدی: راکتورهای پیشران-سوخت با غنای بالا-طیف انرژی نوترون- سطح مقاطع ماکروسکوپی

۱- مقدمه

راکتورهای کوچک ماژولار (SMR) به دلیل داشتن برن آپ بالا ضروری است از سوخت با غنای بالای ۱۰ درصد استفاده نمایند. بزرگترین تجربه در زمینه بهره برداری از راکتورهای کوچک ماژولار هسته ای در نیروی دریایی بوده است. این تجربه ممکن است اساس یک نسل جدید از طرح نیروگاه هسته ای فشرده باشد.

راکتورهای کوچک هسته ای مورد استفاده در پیشران در واقع بخش محرک یک موتور است که بسته به محل استفاده یا سوختی که مصرف می کند دسته بندی می شود. پیشرانهای هسته ای همان طور که از نامشان پیداست از سوخت های هسته ای غنی شده استفاده می کنند. میزان غنای سوخت اتمی مورد نیاز برای

پیشرانهای هسته ای دریایی بالاتر از راکتورهای قدرت حرارتی است. برای مثال راکتورهای جدید OK-900A که در ناوگان یخ شکن آرکتیکای روسی استفاده می شود از اورانیوم ۲۰ تا ۹۰ درصد و به طور متوسط ۶۰ درصد غنی شده استفاده می کند و راکتور KLT-40 در کشتی Sevmorput به طور معمول با اورانیوم ۳۰ تا ۴۰ درصد یا ۹۰ درصد غنی شده کار می کند؛ بنابراین، برای رسیدن به پیشرانهای اتمی، صنعت هسته ای کشور احتمالاً ناگزیر به ارتقای سطح غنی سازی هسته ای به میزان متوسط راکتورهای جدید دریایی یعنی ۵۰ تا ۶۰ درصد خواهد بود.

یکی از موضوعات مهم در طراحی راکتورهای پیشران، بررسی طیف انرژی نوترون ها در قلب راکتور می باشد.

از دلایل بسیار مهم گرایش استفاده از سوخت‌ها با غنای بالا در راکتورهای پیش‌ران، کاهش شار نوترون‌های حرارتی که در نتیجه آن، کاهش سطح مقطع زینان و پیک زینان پس از خاموشی می باشد.

در سال ۲۰۱۹، پیکمن و همکاران (Peakman et al, 2019) در تحقیقی توانستند یک پیش‌ران هسته‌ای با توان ۱۱۰ مگاوات الکتریکی و با سوخت مرسوم دی اکسید اورانیوم با غنای متوسط ۱۶ درصد و حذف بور محلول، طراحی کنند. همچنین اخیراً علم و همکارانش (Alam et al, 2019) از دانشگاه کمبریج در حوزه پیش‌ران هسته‌ای بررسی‌هایی را انجام داده اند که هدف از انجام این تحقیقات مدلسازی محاسباتی طراحی قلب راکتور از نظر نوع سوخت، مواد و هندسه قلب بوده است (Alam te al, 2019) که در راستای تمامی پژوهش‌های صورت گرفته با کدهای مختلف به بررسی طیف انرژی نوترون‌ها در قلب راکتور طراحی شده پرداخته شده است.

در این مقاله برای بررسی تغییرات طیف و سطوح مقاطع مدلسازی مجتمع سوخت با غنای ۳/۶ درصد که غنای رایج راکتورهای قدرت حرارتی است و مدلسازی مجتمع سوخت با غنای ۱۶ درصد که غنای متوسط راکتورهای پیش‌ران می باشد، انجام شده است.

۲- روش مدل سازی

در ابتدای کار برای صحت‌سنجی کتابخانه کد محاسبات سلولی WIMS که یک کد یقینی می باشد مدلسازی یک مجتمع سوخت با مشخصات و هندسه مشخص شده در شکل ۱ با استفاده از کد احتمالاتی MCNP انجام شده است. سپس همین مجتمع سوخت با کد WIMS مدلسازی شده که مشخصات مجتمع سوخت مدل سازی شده به شرح جدول ۱ می باشد.

منظور از طیف انرژی نوترون‌ها در یک راکتور، میزان شار یا تعداد نوترون‌ها در بازه‌های مختلف انرژی می باشد. با توجه به بازه‌های انرژی حرارتی و سریع، طیف انرژی نوترون نشان می‌دهد که نسبت شار نوترون‌های حرارتی به سریع و بالعکس چگونه می باشد.

در راکتورهای پیش‌ران حرارتی، همیشه نسبت شار نوترون‌های حرارتی به نوترون‌های سریع بیشتر می‌باشد. لذا تغییر در سوخت مادامی که در راکتور کندکننده وجود داشته باشد، راکتور حرارتی می باشد. اما به دلایل ذکر شده در راکتورهای پیش‌ران استفاده از سوخت با غنای بالاتر الزامی می باشد در نتیجه افزایش غنای سوخت بر روی طیف انرژی نوترون‌ها تاثیر بسزایی دارد. این مهم، به این دلیل می باشد که هر چه غنای سوخت افزایش می یابد چگالی اتمی اورانیوم ۲۳۸ کاهش می یابد و از آنجا که برای هسته اورانیوم ۲۳۸ و در ناحیه رزنانشی احتمال جذب غیرشکافتی بالا می باشد، احتمال فرار از رزنانش و جذب نوترون‌های سریع در سوخت‌های غنا بالا کاهش می یابد. در نتیجه نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی افزایش می یابد و طیف انرژی نوترون به اصطلاح سخت تر می شود.

از طرفی تولید زینان که از محصولات پاره‌های شکافت است، جزو سموم (جاذب نوترون) ذاتی هر راکتوری می باشد، وابستگی به نرخ شکافت و شار نوترون‌های حرارتی دارد. با وجود تغییر طیف انرژی نوترون در اثر افزایش غنا، سطح مقطع جذب حرارتی زینان تغییر خواهد کرد. یکی از مشکلات موجود در راکتورهای حرارتی با سوخت غنای پایین، انباشت زینان پس از خاموشی است. بنابراین مدت زمانی طول می کشد تا زینان واپاشی کند و راکتیویته اضافی موجود در راکتور بر راکتیویته منفی ناشی از انباشت زینان غلبه نموده و راکتور بحرانی شود. انباشت زینان در راکتورهای قدرت، دارای اهمیت زیادی نمی باشد چرا که راکتورهای قدرت در زمان سوختگیری و یا تعمیرات خاموش می شوند که مدت زمان این عملیات‌ها بیشتر از زمان لازم برای واپاشی زینان می باشد. اما همانطور که اشاره شد راکتورهای پیش‌ران ممکن است مدت زمان بسیار کوتاهی خاموش شوند و با توجه به کاربرد آنها، باید توانایی بحرانی شدن در مدت زمان بسیار کوتاهی پس از خاموشی را داشته باشند. بنابراین یکی

صورت ۶۹ گروهی و ۱۷۲ گروهی اجرا شده اند. کتابخانه های WLUP-69 و WLUP-172 یک ساختار توسعه داده شده سطح مقطع برای کد WIMS می باشد که توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی ارائه شده است (AGENCY 2007). برای کد MCNP از کتابخانه $^{1}ENDF$ (nds.iaea 2020) که یک بانک سطح مقطع با انرژی پیوسته می باشد، استفاده شده است.

لازم به ذکر است برای انجام شبیه سازی ها و تطبیق ضریب تکثیر بینهایت توسط کدهای WIMS و MCNP، تمامی کمیت ها در ورودی هر دو کد یکسان وارد شده اند. این کمیت ها شامل هندسه، نسبت حجم سوخت به کندکننده، درصد وزنی عناصر مختلف، شناسه مواد مختلف، دما و چگالی یکسان می باشد.

با توجه به این که مقدار ضریب تکثیر محاسبه شده توسط کد MCNP را می توان بعنوان مرجع در نظر گرفت، اختلاف نتایج از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\Delta K/K \% = \frac{|K_{WIMS}| - |K_{MCNP}|}{|K_{MCNP}|} \times 100 \quad (1)$$

برای بدست آوردن سطوح مقاطع از دو کد محاسبات زیر ضروری می باشد. با توجه به اینکه کد MCNP نرخ اندرکنش جذب و شکافت را به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار می دهد، میتوان با استفاده از معادله ۲ که نرخ اندرکنش را نشان می دهد سطح مقطع مورد نظر را استخراج نمود.

به صورت کلی نرخ اندرکنش به صورت زیر تعریف می شود:

$$C \int \varphi(E) \Sigma(E) dE = R(E) \quad (2)$$

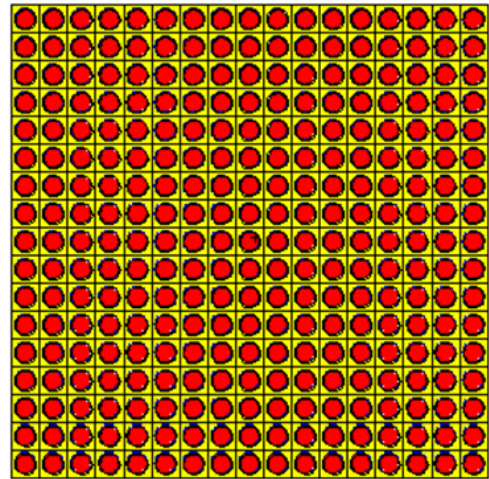
که در آن:

$\varphi(E)$: شار نوترون وابسته به انرژی

$\Sigma(E)$: سطح مقطع ماکروسکوپیک وابسته به انرژی

$R(E)$: نرخ اندرکنش

لازم به ذکر است با توجه به تعداد گروه و بازه های انرژی مشخص شده با تعداد گروه، شار نوترون و سطح مقطع خروجی هر دو کد به انرژی وابسته اند. به همین دلیل ابتدا با مستقل کردن نرخ واکنش و شار بدست



شکل ۱. مجتمع سوخت مدل سازی شده

جدول ۱. مشخصات مجتمع سوخت مدل سازی شده

پارامتر	مشخصات
آرایه میله های سوخت	۱۷ در ۱۷
تعداد میله های سوخت	۲۸۹
هندسه مجتمع سوخت	مربعی
گام میله های سوخت (cm)	۱/۲۶
سوخت	اورانیوم فلزی
غلاف	آلیاژ زیر کونیوم
کند کننده	آب سبک

۳- روش محاسبات

برای انجام محاسبات سلولی استفاده از کد یقینی WIMS به دلیل دارا بودن سرعت و دقت بالا مناسب می باشد اما به دلیل اینکه کتابخانه کد WIMS برای سوخت های با غنای پایین تولید شده است. در این پژوهش ابتدا به بررسی صحت کتابخانه کد WIMS برای سوخت ها با غنای بالای ۱۰ درصد پرداخته شده است که برای بررسی صحت کتابخانه به مقایسه پارامترهای مختلف خروجی از کد WIMS و کد MCNP، پرداخته شده است.

ابتدا به صحت سنجی ضریب تکثیر بینهایت یک مجتمع سوخت شبیه سازی شده در دو کد WIMS و MCNP پرداخته شده است. کد WIMS با کتابخانه های WIMS5، WLUP-69 و WLUP-172 و به

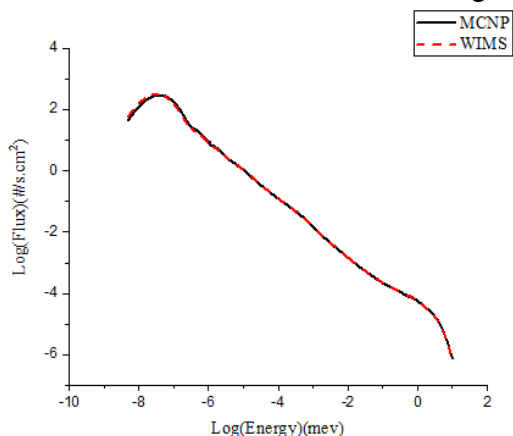
¹ Evaluated Nuclear Data File

جدول ۲. نتایج مقایسه ضریب تکثیر کد WIMS و MCNP

درصد خطای نسبی	نتایج MCNP	نتایج WIMS	کتابخانه	غنای سوخت (%)
0.3139		1.33564	WIMS5B	
0.0503	1.33146	1.33079	WLUP-69	3.6
0.1719		1.33375	WLUP-172	
1.97		1.551194	WIMS5B	
0.046	1.52115	1.52185	WLUP-69	16
0.2103		1.52435	WLUP-172	

با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود در هر دو غنا کتابخانه WLUP-69 کد WIMS با کتابخانه کد MCNP دارای اختلاف کمتری نسبت به سایر کتابخانه‌ها می باشد در نتیجه کتابخانه WLUP-69 برای سوخت‌ها با غنای بالا نیز مناسب می باشد. اما برای اطمینان از سطوح مقاطع کتابخانه ذکر شده در ادامه با استفاده از کتابخانه WLUP-69 سطوح مقاطع و طیف انرژی نوترون از کد WIMS استخراج شده و با نتایج کد MCNP مقایسه شده است

با توجه به نحوه محاسبات ذکر شده در بخش ۳ نتایج مربوط به طیف شار در شکل ۳ و شکل ۲ برای دو غنا قابل مشاهده است.



شکل ۲. مقایسه طیف انرژی نوترون سوخت با غنای ۳/۶ درصد در دو کد WIMS و MCNP

آمده نسبت به انرژی و همچنین مستقل کردن نرخ واکنش از شار بدست آمده در هر بازه انرژی، سطح مقطع لازم بدست آمده است.

همچنین لازم به ذکر است کد WIMS، محاسبات را بدون در نظر گرفتن ارتفاع میله سوخت و به صورت یک بعدی انجام می دهد، بنابراین برای مقایسه طیف انرژی در دو کد، لازم است ابتدا خروجی‌ها هم بعد شود که در این صورت شار حاصل از کد WIMS بر ارتفاع تعریف شده تقسیم شده که شار حاصل در واحد حجم بدست می آید. نحوه محاسبه اختلاف نسبی بین سطوح مقاطع در یک گروه انرژی مشخص با توجه به مبنا قرار دادن نتایج کد MCNP به روش زیر صورت گرفته است:

$$R_g = \left| \frac{\sum wims - \sum mcnp}{\sum mcnp} \right| \quad (3)$$

با توجه به ۶۹ گروهی بودن سطح مقاطع، نیاز به یک معیار خطای تجمعی یا RMS برای تمامی گروه‌های انرژی می باشد که بصورت زیر تعریف می شود:

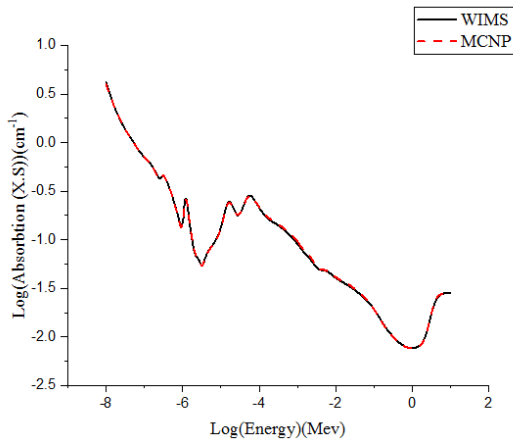
$$RMS = \sqrt{\sum_{g=1}^{69} (R_g)^2} \quad (4)$$

لازم به تاکید است تمامی پارامترها در دمای سرد (۲۹۳/۶ درجه کلوین) و با استفاده از کتابخانه‌های ذکر شده، بدست آمده است.

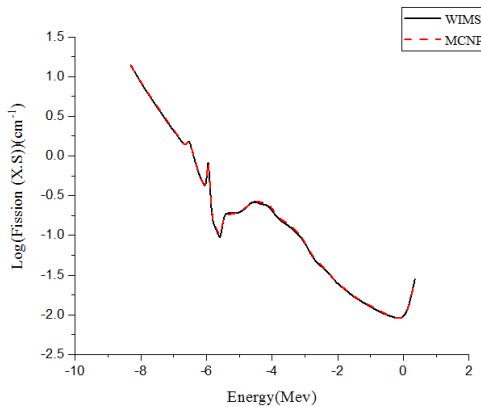
در قسمت بعدی این پژوهش بعد از بررسی صحت کتابخانه کد WIMS برای سوخت‌های با غنای بالای ۱۰ درصد، به بررسی موضوع بسیار مهم تاثیرات تغییر غنای سوخت بر روی طیف انرژی نوترون‌ها و سطوح مقاطع جذب پرداخته شده است.

۴- نتایج مدل سازی

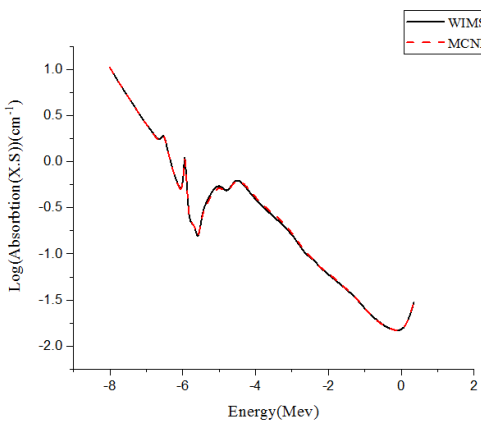
در مرحله اول به صحت سنجی کتابخانه‌های کد WIMS پرداخته شده است همانطور که گفته شد ابتدا به مقایسه ضریب تکثیر بینهایت استخراج شده از دو کد WIMS و MCNP پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.



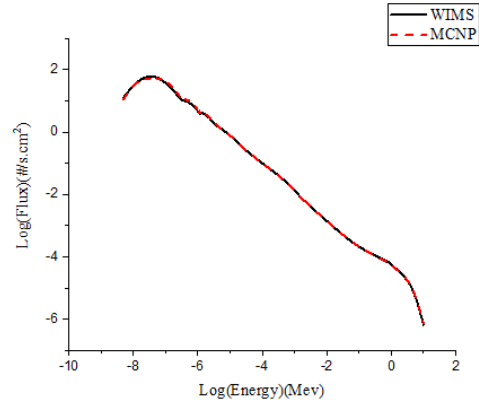
شکل ۵. مقایسه سطح مقاطع جذب سوخت با غنای ۳/۶٪ در دو کد WIMS و MCNP



شکل ۶. مقایسه سطح مقاطع شکافت سوخت با غنای ۱۶٪ در دو کد WIMS و MCNP



شکل ۷. مقایسه سطح مقاطع جذب سوخت با غنای ۱۶٪ در دو کد WIMS و MCNP



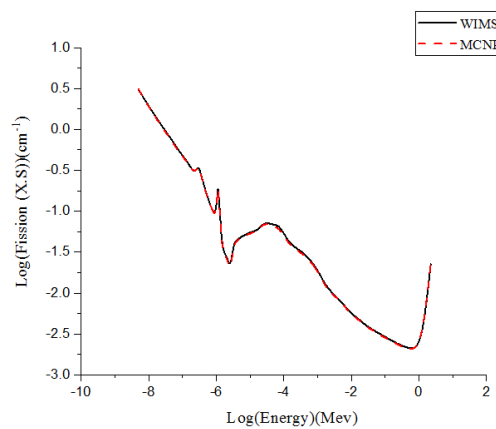
شکل ۸. مقایسه طیف انرژی نوترون سوخت با غنای ۱۶ درصد در دو کد WIMS و MCNP

برای مقایسه بهتر این نمودارها با استفاده از معیار خطای تجمعی RMS، اختلاف طیف شار در دو کد نیز در جدول ۳ آورده شده است.

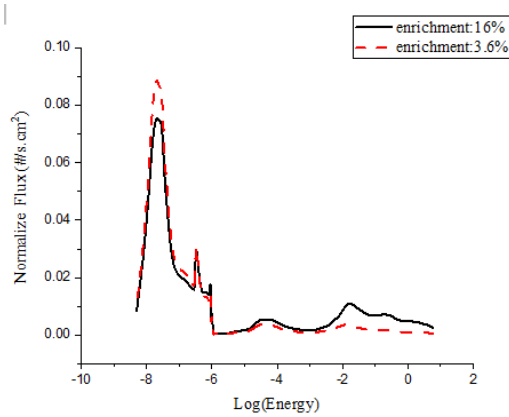
جدول ۳. نتایج مقایسه طیف شار در دو کد WIMS و MCNP

غنای سوخت (%)	RMS (۶۹ گروه انرژی)
3.6	0.00536
16	0.00825

همانطور که در جدول ۳ مشخص شده است اختلاف تجمعی شامل اختلاف در ۶۹ گروه انرژی می باشد که بسیار ناچیزی است. همچنین در شکل های ۴ تا ۷ نمودار سطوح مقاطع ماکروسکوپیک شکافت و جذب برای غناهای پایین و بالا مشاهده می شود.



شکل ۹. مقایسه سطح مقاطع شکافت سوخت با غنای ۳/۶٪ در دو کد WIMS و MCNP



شکل ۸. تغییرات طیف انرژی نوترون نسبت به تغییرات غنای سوخت

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود با افزایش غنای سوخت، به دلیل کاهش چگالی اتمی اورانیوم ۲۳۸ که جاذب نوترون های سریع می باشد، نسبت نوترون های سریع به نوترون های حرارتی افزایش می یابد.

جدول ۴. بررسی سطوح مقاطع میکروسکوپی زینان و ساماریوم در غناهای ۳/۶ درصد و ۱۶ درصد

سطح مقطع	سطح مقطع	سطح مقطع	سطح مقطع	غنای سوخت (%)
سریع ساماریوم	حرارتی ساماریوم	سریع زینان	حرارتی زینان	
3.53343E+01	3.80932E+04	3.26170E+01	1.28031E+06	3.6
2.41148E+01	2.29481E+04	1.73008E+01	6.83656E+05	16

همچنین در جدول ۶ مشاهده می شود با سخت شدن طیف انرژی نوترون ها، سطح مقطع جذب حرارتی زینان و ساماریوم کاهش می یابد که در نتیجه ی آن پیک زینان پس از خاموشی نیز کاهش می یابد که مزیت مهمی در راکتورهای پیشران به شمار می رود. همچنین در شکل ۹ تغییرات تاثیر افزایش غنا بر سطح مقطع جذب سوخت قابل مشاهده می باشد

همانطور که در شکل های ۴ تا ۷ مشاهده می شود اختلاف سطوح مقاطع در سوخت با غنای بالا با کتابخانه منتخب بسیار ناچیز و قابل صرف نظر می باشد. اختلاف جمعی سطوح مقاطع استخراج شده از دو کد در جدول ۴ آورده شده است:

جدول ۴. اختلاف جمعی سطوح مقاطع استخراج شده از دو کد MCNP و WIMS

غنای سوخت (%)	RMS سطح مقطع جذب	RMS سطح مقطع شکافت
3.6	0.0603	0.0161
16	0.06224	0.03038

همانطور که در جدول ۵ ملاحظه می شود اختلاف جمعی ذکر شده در ۶۹ گروه انرژی می باشد. بنابراین کتابخانه WLUP-69 کد WIMS برای سوخت ها با غنای بالای ۱۰ درصد دارای سطوح مقاطع و پارامترهای نوترونیکی مناسب جهت محاسبات نوترونیکی و طراحی قلب راکتورهای دارای غنای بالای ۱۰ درصد می باشد. با توجه به صحت سنجی کتابخانه WLUP-69 در ادامه برای بررسی تاثیرات افزایش غنای سوخت بر توزیع انرژی نوترون ها، طیف انرژی نوترون برای دو غنای ۳/۶٪ و ۱۶٪ استخراج و مقایسه شده که در شکل ۸ آورده شده است.

۶- مراجع

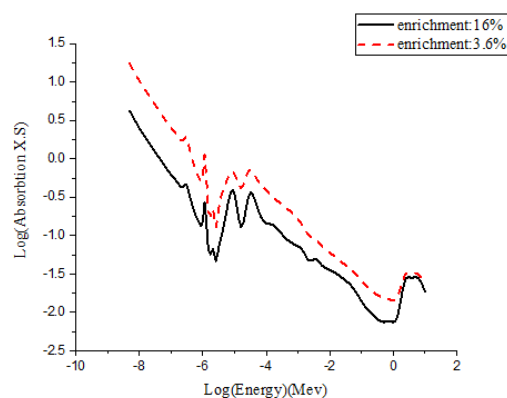
AGENCY, I. A. E. (2007). "WIMS-D LIBRARY UPDATE." WLUP.

Aiden Peakman, H. O., Tim Abram (2019). "The core design of a Small Modular Pressurised Water Reactor for commercial marine propulsion." Elsevier.

nds.iaea. (2020). "Evaluated Nuclear Data File(ENDF)."

Syed Bahauddin Alam, D. K., Bader Almutairi, Palash Kumar Bhowmik, and G. T. P. Cameron Goodwin (2019). "Small modular reactor core design for civil marine propulsion using microheterogeneous duplex fuel. Part I: Assembly-level analysis" Elsevier.

Syed Bahauddin Alam, D. K., Bader Almutairi, Palash Kumar Bhowmik, and G. T. P. Cameron Goodwin (2019). "Small modular reactor core design for civil marine propulsion using microheterogeneous duplex fuel. Part II: whole-core analysis." Elsevier.



شکل ۹. تغییرات تأثیر افزایش غنا بر سطح مقطع جذب سوخت

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود با افزایش غنای سوخت سطح مقطع جذب سوخت کاهش می یابد که این امر منجر به افزایش شار نوترون های سریع نسبت به نوترون های حرارتی می شود و سطح مقطع جذب زینان کاهش پیدا می کند.

۵- نتیجه گیری

با توجه به اینکه راکتورهای پیشران ملزم به راه اندازی در مدت زمان کوتاهی پس از خاموشی هستند و این امر تنها با کاهش زینان انباشته پس از خاموشی امکان پذیر است. در این پژوهش ابتدا به صحت سنجی کتابخانه های کد WIMS در غنای متوسط راکتورهای پیشران، غنای ۱۶ درصد، با مقایسه با کد احتمالاتی MCNP پرداخته شد که از نتایج بدست آمده مشاهده شد کتابخانه WLUP-69 کد WIMS مناسب ترین کتابخانه برای محاسبات نوترونیکی سوخت های دارای غنای بالای ۱۰ درصد می باشد و در ادامه با کتابخانه منتخب به بررسی تأثیر تغییر غنا بر طیف انرژی نوترون ها که بر سطح مقطع جذب زینان تأثیر می گذارد پرداخته شد که این بررسی نشان داد با افزایش غنای سوخت به دلیل اینکه جذب نوترون های سریع کاهش می یابد نسبت شار نوترون های حرارتی به شار نوترون های سریع افزایش می یابد که منجر به کاهش سطح مقطع جذب زینان و در نتیجه آن کاهش انباشت زینان پس از خاموشی می گردد که برای راه اندازی مجدد راکتورهای پیشران در مدت زمان کوتاهی پس از خاموشی الزامی می باشد.

The effect of using above 10% fuels enrichment on neutron energy spectrum and absorption cross sections

M. Dehghani^{*1}, M. Abbasi¹, M. Hosseinlou¹

¹Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 07 - 02 - 2021

Accepted: 05 - 04 - 2021

Abstract

One of the most important issues in reactor design is the neutron energy or neutron energy spectrum at the reactor core. nuclear reactors have different fuel enrichment depending on the application. Propulsion reactors are among the reactors that must have lower xenon after shutdown to be able to turn on the reactor for a long time shortly after shutdown. Therefore, determining the correct enrichment of fuel is required to study the effect of increasing enrichment on the energy of neutrons and absorption cross sections. In this paper, while validating WIMS code libraries for use in fuels with an enrichment of more than 10%, the effect of using fuels with an enrichment of more than 10% on the neutron energy spectrum and absorption cross sections, especially the thermal absorption cross section of xenon has been investigated. The results showed that the increase in enrichment leads to a decrease in the cross-section of Xenon absorption and as a result, a decrease in Xenon peak after shutdown.

Keywords: propulsion reactors ,high enrichment fuel ,neutron energy spectrum ,macroscopic cross section
