



ارزیابی نوترونیک سوخت چگال غنای پایین U_3Si_2-Al به عنوان سوخت جایگزین برای راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی ایران با استفاده از کد DRAGON^۴

جواد مختاری^۱، امیر سعید شیرانی^۱، امید صفرزاده^۱، جمشید خورسندی^۲

^۱ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

^۲ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده

در این تحقیق، امکان تبدیل سوخت راکتور چشمه نوترونی ایران به سوخت چگال U_3Si_2-Al با غنای زیر ۲۰٪ و با حداقل تغییرات ساختاری ممکن، بررسی شده است. بررسی‌های نوترونیک با استفاده از کد DRAGON^۴ در سه بعد انجام شده است. ابتدا برای اعتبارسنجی کد، راکتور با سوخت غنای بالای اولیه مدل شد. مقایسه نتایج کد با نتایج موجود در مدارک راکتور نشان داد که نتایج کد دارای دقت مناسب می‌باشند. در مرحله‌ی بعد سوخت U_3Si_2-Al مورد بررسی قرار گرفت. سوخت با غنای ۱۹/۷۵٪ با تغییر اندک در قطر گوشت سوخت و بدون تغییر در اندازه قطر خارجی سوخت، انتظارات نوترونیک را برآورده ساخت.

کلیدواژه: MNSR، تبدیل غنا، کد DRAGON^۴، U_3Si_2-Al

مقدمه

به دلیل وجود نگرانی‌هایی در کاربرد غیر صلح آمیز سوخت‌های هسته‌ای غنای بالا (HEU)^۱، برنامه‌ای تحت عنوان کاهش غنا برای راکتورهای تحقیقاتی و آزمایشگاهی (RERTR)^۲ معرفی گردید. آژانس بین‌المللی انرژی اتمی با حمایت از این برنامه، تمامی کشورهایی که از راکتورهای تحقیقاتی با سوخت غنا بالا استفاده می‌کنند را مکلف نمود تا سال ۲۰۱۸ سوختشان را به غنای زیر ۲۰٪ تبدیل نمایند. بر طبق این برنامه هنگام تبدیل قلب، شار و توان راکتور نباید کاهش چشم‌گیری داشته باشد، ساختار قلب و سیستم‌های موجود در راکتور تغییرات اساسی نداشته باشد، حاشیه ایمنی و قابلیت اطمینان سوخت تغییر نکند و راکتور نیاز به دریافت مجدد معجز ایمنی نداشته باشد.

غنای سوخت راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی ایران (MNSR)^۳ حدود ۹۰٪ است. با توجه به الزامات مذکور بایستی سوخت راکتور MNSR به سوخت غنای پایین تبدیل گردد. در کشورهای دارنده راکتور MNSR مطالعات مشابهی روی سوخت U_3Si_2-Al به عنوان سوخت غنای کم (LEU)^۴ جایگزین انجام شده است. از این جمله می‌توان به مطالعات آقایان آبتین [۱] و زارع [۲] در ایران، Albrahom [۳] در سوریه، Waqar [۴] و Nawaz [۵] در پاکستان و مطالعات Matos [۶] و Sampong [۷] در غنا روی راکتور MNSR اشاره کرد.

روش کار و نتایج

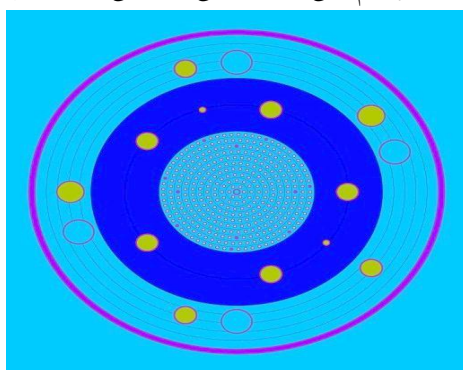
^۱ High Enriched Uranium

^۲ Reduced Enrichment for Research and Test Reactors

^۳ Miniature Neutron Source Reactor

^۴ Low Enriched Uranium

ابتدا مدل دوبعدی راکتور MNSR ایران در ارتفاع مرکزی میله سوخت با استفاده کد DRAGON^۴ برای نمایش هندسه راکتور، مدل‌سازی و سپس با استفاده از مدول‌های LIB، GEO، ASM، FLU، SHI، NXT و PSP شبیه‌سازی شد. در شکل ۱ هندسه‌ی مدل شده راکتور نمایش داده شده است که در آن اورانیوم سفیدرنگ، آلومینیوم ارغوانی‌رنگ، هوا زردرنگ، برلیوم آبی‌رنگ و آبی آسمانی، رنگ آب است.



شکل ۱: راکتور MNSR ایران

در مرحله بعد راکتور با سوخت HEU (UAl_۳-Al) با غنای ۸۹/۹۷٪ اورانیوم (۲۳۵) به صورت سه بعدی با مدول NXT برای محاسبه ضریب تکثیر موثر و شار نوترون‌ها شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی هندسه‌ی راکتور در مدول GEO، کل راکتور به صورت یک سلول مکعبی (CAR^۳D) در نظر گرفته شد. محاسبات بحرانی راکتور در دو حالت میله کنترل کاملاً خارج از قلب راکتور و میله کنترل کاملاً داخل قلب راکتور در دمای ۳۰۰ کلوین انجام شد و مقادیر ضریب تکثیر موثر بدست آمد. اختلاف مقادیر ضریب تکثیر موثر ارزش کل میله کنترل را تعیین می‌کند. در جدول ۱ مشخصات بحرانی راکتور با مقادیر موجود در مدارک راکتور مقایسه شده است. خطای ضریب تکثیر موثر محاسبه شده توسط کد ۰/۰۰۴٪ است. این امر نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب محاسبات کد و شبیه‌سازی درست مسئله می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه مشخصات بحرانی راکتور در حالت HEU

مدارک راکتور	DRAGON	
۱/۰۰۳۸۵	۱/۰۰۳۸۹	K_{eff} (میله کنترل کاملاً بیرون از قلب)
۰/۹۹۷۳۵	۰/۹۹۶۹۴۰۹	K_{eff} (میله کنترل کاملاً داخل قلب)
۱۳/۸۵	۳/۸۹	راکتیویته اضافی mk
۳-۷ یا ۲-۶/۸	-۶/۹۴۹	ارزش کل میله کنترل mk
$1 \times 10^{12} \pm (3\%)$	$1/0.2 \times 10^{12}$	شار حرارتی در سایت داخلی $\frac{n}{cm^2s}$
5×10^{11}	$4/25 \times 10^{11}$	شار حرارتی در سایت خارجی $\frac{n}{cm^2s}$

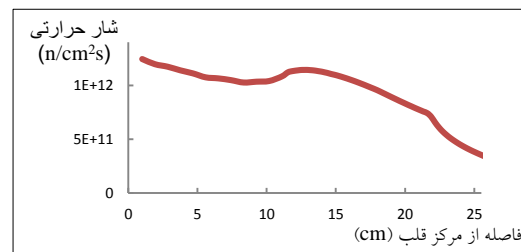
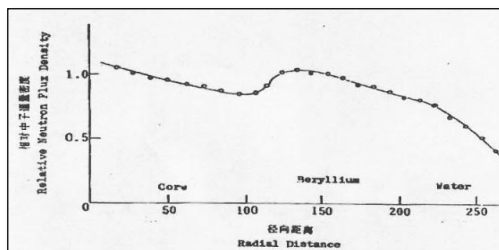
شار در کانال پرتودهی داخلی مطابقت خوبی با نتایج بدست آمده از کد DRAGON دارد. در اسناد راکتور، شار در کانال‌های پرتودهی خارجی به صورت دقیق گزارش نشده است. در کشورهای دارنده‌ی راکتور شار در سایت‌های پرتودهی خارجی بین $4 \times 10^{11} n/cm^2s$ تا $5 \times 10^{11} n/cm^2s$ گزارش شده است، از طرفی هم مقادیر

۱- این عدد توسط مرکز هسته‌ای اصفهان گزارش شده است.

۲- این عدد در مدارک راکتور گزارش شده است.

۳- این عدد در آزمایشات مرکز هسته‌ای اصفهان گزارش شده است.

بدست آمده از کد برای توان ۲۷ کیلووات محاسبه شده است. اگر شار نوترون‌های حرارتی در توان ۳۰ کیلووات مد نظر باشد، مقادیر شار در سایت‌های پرتودهی داخلی و خارجی به ترتیب برابر 1.13×10^{12} n/cm²s و 4.72×10^{11} n/cm²s بدست می‌آیند. می‌توان گفت این شارها با خطای مناسب، مطابقت خوبی با نتایج بدست آمده از کد DRAGON دارند. بنابراین مقادیر شار بدست آمده از کد قابل اعتماد است. در نمودار ۱-الف شار شعاعی نوترون‌های حرارتی محاسبه شده با کد DRAGON در ارتفاع مرکزی قلب راکتور MNSR ایران در توان ۲۷ کیلووات رسم شده است. برای مقایسه الگوی شار نوترون‌های حرارتی، در نمودار ۱-ب شار نسبی نوترون‌های حرارتی به ازای فاصله شعاعی از مرکز قلب راکتور بر واحد میلی‌متر که در اسناد راکتور موجود بود، نمایش داده شده است [۸]. مقایسه نمودارها گویای این مطلب است که الگوی شار شعاعی نوترون‌های حرارتی محاسبه شده با کد DRAGON برای راکتور MNSR قابل قبول است.



نمودار ۱-الف: شار شعاعی نوترون‌های حرارتی محاسبه شده با کد نمودار ۱-ب: شار شعاعی حرارتی نسبی موجود در مدارک

راکتور [۸]

در مرحله بعد، سوخت مخلوطی پراکنده U_3Si_7-Al با غنای ۱۹/۷۵٪ با خصوصیات موجود در جدول ۲ انتخاب شد. محاسبات بحرانیات برای تعداد ۳۵۰ میله سوخت با غلاف آلومینیوم بدون تغییر در قطر گوشت سوخت و ضخامت غلاف انجام شد. مقدار ضریب تکثیر موثر توسط کد DRAGON برابر 0.9929566 بدست آمد. در این حالت کسری راکتیویته تا $1/0.04$ حدود 11 mk می‌باشد. برای افزایش ضریب تکثیر موثر تا مقدار $1/0.04$ تغییراتی در ساختمان میله سوخت انجام شد. در مرحله اول با ثابت نگه داشتن قطر خارجی میله سوخت، قطر گوشت سوخت از $4/3$ mm به $4/43$ mm افزایش یافت و بنابراین ضخامت غلاف سوخت برابر $0/535$ mm شد. در این حالت مقدار ضریب تکثیر با استفاده از کد DRAGON برای 350 میله سوخت برابر $1/0.04435$ و برای 349 میله سوخت برابر $1/0.034$ بدست آمد. محاسبات بحرانیات مشابه با کد احتمالاتی MCNP در دانشگاه شهید بهشتی تهران توسط آقای زارع انجام شده است. نتایج برای مقایسه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲: خصوصیات مواد سوخت U_3Si_7-Al انتخاب شده در مقایسه با سوخت HEU

UAl_4-Al	U_3Si_7-Al	
۳/۴۰۳	۶/۴۳	چگالی گوشت سوخت (gr/cm ³)
۵/۷	۱۲/۲	چگالی فاز مخلوط (gr/cm ³)
۶۴	۹۲/۵	درصد وزنی U در فاز مخلوط
۳/۷	۱۱/۳	چگالی U در فاز مخلوط
۰/۹۴۶	۴/۴۲	چگالی U در گوشت سوخت
۲۳/۴۴	۳۹/۲	درصد حجمی فاز مخلوط
۸۹/۹۷	۱۹/۷۵	درصد غنای U^{235}
۷۲/۳۷	۲۵/۵۵	درصد وزنی Al در گوشت سوخت

جدول ۳: مقایسه مشخصات بحرانی راکتور، محاسبه شده با کدهای MCNP و DRAGON

LEU (MCNP)		LEU (DRAGON)			HEU مدارک راکتور	
۴/۴۳	۴/۳	۴/۴۳	۴/۴۳	۴/۳	۴/۳	قطر گوشت سوخت (mm)
۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	قطر خارجی میله سوخت (mm)
۳۵۰	۳۵۰	۳۴۹	۳۵۰	۳۵۰	۳۴۳	تعداد میله سوخت
۱/۰۰۴۸۵	۰/۹۹۷۹۴	۱/۰۰۳۴	۱/۰۰۴۴۳۵	۰/۹۹۲۹۵۶۶	۱/۰۰۳۸۵	K_{eff} (میله کنترل خارج از قلب)
۰/۹۹۸۷۳	-	۰/۹۹۷۲۵۳	۰/۹۹۷۵۷	-	۰/۹۹۶۸۵	K_{eff} (میله کنترل داخل قلب)
۴/۸۳	-	۳/۴	۴/۴۳۵	-	۳/۸۵	راکتیویته اضافی (mk)
-۶/۰۹۸۲	-	-۶/۱۵	-۶/۷۸	-	-۷	ارزش کل میله کنترل (mk)
۱/۲۶۸۲	-	۲/۷۵	۲/۴۳	-	۳/۵	حاشیه ایمنی خاموشی (mk)
-	-	-	$۰/۹۹ \times ۱۰^{۱۲}$	-	$۱۰^{۱۲}$	شار حرارتی در سایت داخلی $\frac{n}{cm^2s}$
-	-	-	$۴/۱۹ \times ۱۰^{۱۱}$	-	۵×۱۰^{۱۱}	شار حرارتی در سایت خارجی $\frac{n}{cm^2s}$

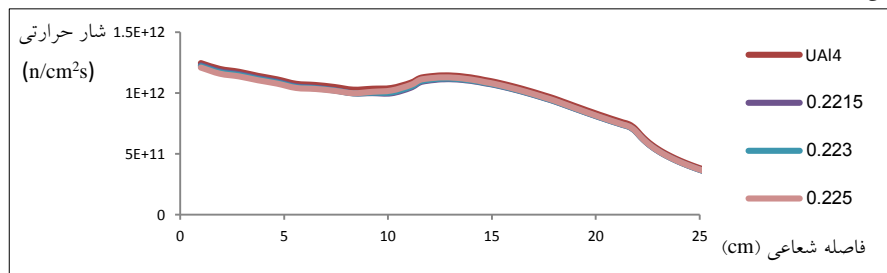
مواد به کار رفته در سوخت تحویلی از کارخانه‌های تولیدکننده سوخت با مواد به کار گرفته شده در سوخت شبیه‌سازی شده دارای اختلافاتی هستند. بعلاوه سوخت ساخته شده ممکن است که یکنواخت نباشد. با توجه به مطالب ذکر شده، در طراحی‌های نوترونیک سوخت راکتور MNSR باید حد اطمینانی برای این اختلافات در نظر گرفته شود، بنابراین باید با تعداد کمتری میله سوخت به ضریب تکثیر حدود ۱/۰۰۴ برسیم. ضریب تکثیر موثر با تعداد ۳۴۹ میله سوخت راضی‌کننده نیست و این یعنی حتی یک میله سوخت هم برای حد اطمینان نداریم.

در مرحله بعد برای رسیدن به ضریب تکثیر موثر در حد ۱/۰۰۴ و با تعداد کمتری میله سوخت تغییراتی در ساختمان میله سوخت انجام شد. در این مرحله دو نوع سوخت در نظر گرفته شد. در هر دو نوع سوخت، قطر خارجی میله سوخت ثابت در نظر گرفته شده است. در یکی قطر گوشت سوخت از ۴/۳ mm به ۴/۵ mm و در دیگری به ۴/۶ mm تغییر داده شد. بنابراین ضخامت غلاف سوخت به ترتیب برابر ۰/۵ mm و ۰/۵۲ mm شد. در این حالت‌ها مقدار ضریب تکثیر با استفاده از کد DRAGON برای ۳۵۰ میله سوخت به ترتیب برابر ۱/۰۱۰۶۲۹ و ۱/۰۰۷۰۸۸ بدست آمد. پس از آن محاسبات با کاهش میله‌های سوخت از مدار دهم ادامه یافت. سرانجام ضریب تکثیر موثر برای قلب با قطر گوشت سوخت ۴/۵ mm و ۳۴۱ میله سوخت برابر ۱/۰۰۳۸۹۲ و برای قلب با قطر گوشت سوخت ۴/۶ mm و ۳۴۶ میله سوخت برابر ۱/۰۰۴۲۴۱ شد. نتایج این محاسبات در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مقایسه مشخصات بحرانی راکتور MNSR

LEU (DRAGON)	LEU (DRAGON)	HEU (DRAGON)	HEU مدارک راکتور	
۴/۴۶	۴/۵	۴/۳	۴/۳	قطر گوشت سوخت
۳۴۶	۳۴۱	۳۴۳	۳۴۳	تعداد میله سوخت
۱/۰۰۴۲۴۱	۱/۰۰۳۸۹۲	۱/۰۰۳۸۹	۱/۰۰۳۸۵	K_{eff} (میله کنترل بیرون از قلب)
۰/۹۹۷۵۵۱	۰/۹۹۷۳۵۳	۰/۹۹۶۹۴۰	۰/۹۹۶۸۵	K_{eff} (میله کنترل داخل قلب)
۴/۴۲۱	۳/۸۹۲	۳/۸۹	۳/۸۵	راکتیویته اضافی (mk)
-۶/۶۹	-۶/۵۴	-۶/۹۴۹	-۷	ارزش کل میله کنترل (mk)
۲/۴۴۹	۲/۶۴۷	۳/۰۵۹	۳/۱۵	حاشیه ایمنی خاموشی (mk)
۳/۱۳۷	۳/۱۹۳	۲/۸۳	۲/۸۳	مقدار U^{235} موجود در یک میله (گرم)
۱۰۸۵	۱۰۸۹	۹۷۰	۹۷۰	مقدار U^{235} موجود در قلب (گرم)
$۰/۹۹ \times ۱۰^{۱۲}$	$۰/۹۹ \times ۱۰^{۱۲}$	$۱/۰۲ \times ۱۰^{۱۲}$	۱×۱۰^{۱۲}	شار حرارتی در سایت داخلی $\frac{n}{cm^2s}$
$۴/۱۷ \times ۱۰^{۱۱}$	$۴/۱۵ \times ۱۰^{۱۱}$	$۴/۲ \times ۱۰^{۱۱}$	۵×۱۰^{۱۱}	شار حرارتی در سایت خارجی $\frac{n}{cm^2s}$
۱۸۲/۲۵۲۶۶	۱۸۱/۶۵۲۰۴	۱۹۸/۳۰۵۹	۱۹۳	نسبت کندکننده به سوخت ($NH_{VH}/NU^{235}VU^{238}$)

در نمودار ۲ شار شعاعی نوترون‌های حرارتی برای گوشت سوخت U_3Si_2-Al با شعاع‌های مختلف با سوخت HEU مقایسه شده است. برای سوخت غنای کم شار حرارتی حدود ۱٪ کاهش می‌یابد. این مشکل با افزایش اندک توان قابل جبران است.



نمودار ۲: مقایسه شار حرارتی شعاعی برای سوخت U_3Si_2-Al با شعاع‌های مختلف با سوخت HEU برای اطمینان بیشتر از نتایج بدست آمده، نتایج مشابه برای مقایسه در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقایسه مطالعات کشورهای مختلف روی سوخت U_3Si_2-Al برای راکتور MNSR

Matos Ghana	Sampong Ghana	Nawaz Pakistan	Waqar Pakistan	Albrahom Syria	Abtin Iran	
MCNP	MCNP	WIMSD- ϵ , CITATION	WIMSD- ϵ , CITATION	WIMSD- ϵ , CITATION	MCNP	کد محاسباتی
۱۹/۷۵	۱۹/۷۵	۲۲/۳۱	۲۰/۷	۱۹/۷۵	۱۶/۶۶	غناي سوخت
۴/۷۴	-	۴/۳	۴/۳	۴/۳۴	۴/۳	قطر داخلی میله سوخت (mm)
۵/۵	-	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	قطر خارجی میله سوخت (mm)
۳۴۷	۳۴۴	۳۴۴	۳۴۴	۳۴۷	۳۴۳	تعداد میله سوخت
۸/۳	۴/۳۱	۴/۰۲۸	۴/۳	۴/۱۵۳۷	۴/۵۱۹	راکتیویته اضافی (mk)
-	-۶/۶۵۵	-۶/۱۱۵	-	-۶/۴۶۳	-۷/۰۸	ارزش میله کنترل (mk)

بحث و نتیجه گیری

مشخصات بحرانیات برای سوخت U_3Si_2-Al پیشنهادی با غنای کاهش یافته ۱۹/۷۵٪ و قطر گوشت‌های افزایش یافته تا ۴/۵ mm و ۴/۶۶ mm راضی کننده است. نتایج موجود در جدول‌های ۱ و ۵ نشان می‌دهد که نتایج کد DRAGON برای سوخت چگال U_3Si_2-Al قابل قبول است. برای سوخت HEU نسبت تعداد اتم‌های کندکننده به اتم‌های سوخت شکافا برابر ۱۹۸/۳۰۵۹ است که تحت کندکننده می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۴ دیده شد، برای سوخت‌های منتخب نسبت تعداد اتم‌های هیدروژن به اتم‌های اورانیوم ۲۳۵ کمتر از سوخت HEU است، بنابراین برای سوخت‌های منتخب راکتور تحت کندکننده می‌باشد و حتی از این لحاظ ایمن‌تر هم شده است. بنابراین سوخت چگال U_3Si_2-Al با غلاف آلومینیوم می‌تواند به عنوان سوخت جایگزین استفاده شود.

مراجع

- [۱] F. Abtin, S.A.H. Fegghi, S. Jafarikia, Neutronic evaluations for MNSR research reactor core conversion from HEU to LEU, Annals of Nuclear Energy ۵۱, ۶۹-۷۳, ۲۰۱۲.
- [۲] زارع درنیانی، محمد کریم، طراحی نوترونیک قلب راکتور MNSR/ایران با سوخت‌های غنای کم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی هسته‌ای با راهنمایی استاد شهید دکتر مجید شهریاری، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی
- [۳] Albarhoum, M. Thermal-hydraulics features of the use of LEU U_3Si_2 fuel in Lowpower Reactors, Annals of Nuclear Energy ۳۷ (۱۰), ۱۳۵۱-۱۳۵۵, ۲۰۱۱.
- [۴] Sadaf Waqar, Sikander M. Mirza and Nasir M. Mirza, a Comparative Neutronic Study of the Standard HEU Core and Various Potential LEU Alternatives for a typical MNSR System, Nucl, Eng. Des, ۲۳۸, issue ۹, ۲۳۰۲-۲۳۰۷, ۲۰۰۸.
- [۵] Amjad Nawaz, Analysis of core life-time and neutronic parameters for HEU and potential LEU/MEU fuels in a typical MNSR, Annals of Nuclear Energy ۴۷ (۲۰۱۲) ۴۶-۵۲
- [۶] Matos J.E., Lell R.M., RERTR Program, Feasibility Study of Potential LEU Fuels for a Generic MNSR Reactor, Argonne National Laboratory, ۲۰۰۵.
- [۷] Sampong S., Maakuu B., Akaho E, Progress in the neutronic core conversion (HEU-LEU) Analysis of GHANA Research Reactor-۱, Intl, Mtg, on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, ۲۰۰۶.
- [۸] Safety Analysis Report (SAR) For Miniature Neutron Source Reactor, China Institute Of Atomic Energy, ۱۹۹۳