



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

محاسبه پارامتر های نوترونی وابسته به شتاب دهنده برای قلب راکتور هسته ای ADS

۱. محمد مهدی فیروزآبادی* ۲. جواد کریمی ۳. مهدی زنگیان.

۱، ۲. دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک. ۳. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای

چکیده:

در این تحقیق در اولین بخش از چهار عنصر سنگین شامل: سرب، جیوه، تانتالیم و تنگستن به عنوان ماده هدف در فرآیند تلاشی در یک راکتور ADS استفاده شد و با کمک مدل آبشار درون هسته ای Bertini (INC- Bertini) محاسبات مربوط به فرآیند تلاشی ماده هدف برای پروتون هایی در بازه انرژی بین 115 MeV تا 5 GeV انجام شد. طبق نتایج بدست آمده از این مدل برای این چهار عنصر سنگین، تنگستن بیشترین تعداد نوترون را تولید کرد و به عنوان هدف تلاشی برای محاسبات بعدی انتخاب شد. در دومین بخش حساسیت پارامتر های نوترونی قلب یک راکتور ADS را نسبت به تغییر انرژی پروتون ها در خروجی شتاب دهنده بررسی شد. برای این منظور پارامتر های نوترونی شامل: $G, G_0, Y_{n/p}, M, \left(\frac{P_{max}}{P_{ave}}\right)_{Radial\ and\ Axial}, P_{acc}, I_p$ با استفاده از کد $mcnpx$ محاسبه شد. تغییر در انرژی پروتون ها از 115 تا 1400 MeV باعث افزایش $Relative\ Difference\%$ کمیت های G و $Y_{n/p}$ به ترتیب به مقدار 289.99% و 199.15% و همچنین کاهش $Relative\ Difference\%$ در جریان باریکه پروتونی (I_p) و توان شتاب دهنده (P_{acc}) به ترتیب به مقدار 99.81% و 75.66% شد. بنابراین طبق این نتایج بدست آمده می توان گفت که در یک راکتور ADS انتخاب ماده هدف مناسب در فرآیند تلاشی، که بازای پروتون هایی با انرژی مشخص نوترون بیشتری تولید نماید دارای اهمیت است، همچنین بررسی حساسیت پارامتر های نوترونی قلب راکتور نسبت به تغییر انرژی پروتون ها به عنوان یکی از پارامتر های شتاب دهنده در طراحی بهینه یک راکتور ADS نقشی مهم دارد.

کلمات کلیدی: هدف، قلب زیر بحرانی، فرآیند تلاشی، ADS

۱. مقدمه

راکتور ADS^۱ نسل جدیدی از راکتور های هسته ای است [۱] و از آنها برای تولید انرژی و همچنین تبدیل زباله های هسته ای استفاده می شود. این راکتور ها به صورت زیر بحرانی عمل می کنند و مقدار ضریب تکثیر موثر برای چنین

¹ Accelerator Driven Subcritical system



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

سیستم هایی کمتر از یک است ($k_{eff} < 1$). بنابراین برای حفظ واکنش های زنجیره ای شکافت در قلب راکتور از یک چشمه خارجی تولید نوترون استفاده می شود. یک راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده از سه بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از [۲]: شتاب دهنده ذرات^۲، هدف تلاشی^۳، قلب زیر بحرانی^۴.

در این راکتور از شتاب دهنده برای ایجاد باریکه ای از ذرات باردار شتاب داراز جمله باریکه پروتونی استفاده می شود. این ذرات باردار پر انرژی به سمت هدف تلاشی واقع در مرکز قلب زیر بحرانی هدایت می شوند. در اثر برخورد ذرات باردار شتاب دار با هدف، فرایند تلاشی رخ می دهد. بازای هر ذره باردار فرودی تعدادی نوترون تولید می شود. تعداد نوترون های تولید شده به نوع ماده هدف، ابعاد هدف، نوع ذره باردار و انرژی ذره بستگی دارد. بدین ترتیب یک چشمه خارجی تولید نوترون ایجاد می شود. نوترون های حاصل از این چشمه خارجی به سمت قلب زیر بحرانی واقع در اطراف هدف تلاشی حرکت می کنند و باعث پایداری واکنش های زنجیره ای شکافت در قلب راکتور می شوند. در راکتور های هسته ای ADS می توان زباله های هسته ای با نیمه عمر و مسمومیت پرتویی بالا مانند پاره های شکافت و عناصر فرا اورانیومی را که از نظر زیست محیطی بسیار خطرناک اند را تبدیل نمود [۳]. تعداد نوترون های تولید شده بازای یک پروتون با انرژی مشخص در فرآیند تلاشی یکی از پارامتر های مهم در یک راکتور ADS می باشد. در فرآیند تلاشی برای اینکه تعداد نوترون های تولیدی افزایش یابد از عناصر سنگین به عنوان هدف استفاده می شود. در این تحقیق در بخش اول از عناصر سرب، جیوه، تانتالیم و تنگستن به عنوان هدف در فرآیند تلاشی استفاده شد و تعداد نوترون های تولید شده بازای یک پروتون را در بازه انرژی بین 115 Mev تا 5 Gev مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه ساخت یک شتاب دهنده برای تولید ذرات باردار شتاب دار با انرژی های بالا از لحاظ فنی مشکل و نیازمند صرف هزینه های زیاد می باشد، بنابراین در طراحی یک راکتور ADS بایستی طوری عمل شود که برخی از پارامتر های نوترونی وابسته به شتاب دهنده بهینه شوند.

در طراحی یک راکتور ADS بررسی حساسیت پارامتر های نوترونی قلب راکتور نسبت به تغییر انرژی پروتون ها به عنوان یکی از پارامترهای شتاب دهنده دارای اهمیت است که در بخش دوم این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از راکتور Triga RC1 به عنوان یک نمونه از راکتور های ADS استفاده شد [۴]. راکتور Triga RC1 یک راکتور تحقیقاتی با قدرت 1 MW است که در مرکز ENEA CASACCIA در کشور ایتالیا قرار دارد. در این راکتور از آب معمولی به عنوان خنک کننده و از یک شتاب دهنده پروتونی از نوع سیکلوترون (Cyclotron) برای تولید باریکه ای از پروتون ها با انرژی 115 Mev و جریان 2 mA استفاده شده است.

۲. هندسه قلب راکتور

². particles accelerator

³. spallation target

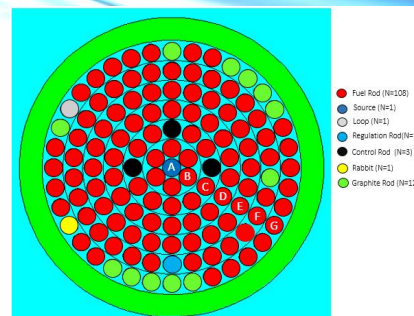
⁴. subcritical core



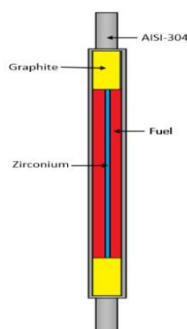
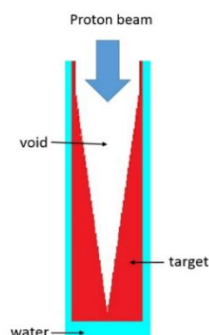
بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

قلب راکتور Triga RC1 از یک استوانه بزرگ با ارتفاع 72cm و قطر 56.5cm تشکیل شده است، طوریکه درون این استوانه بزرگ یک ساختار حلقوی از استوانه های دیگری وجود دارد (شکل ۱). این ساختار شامل هفت حلقه هم مرکز با شعاع های متفاوت است. در این ساختار حلقوی تعداد 126 حفره^۵ برای قرارگیری میله های سوخت، کنترل، گرافیت، regulation، rabbit، loop و همچنین



در مرکز این ساختار حفره ای برای قرارگیری هدف تلاشی در نظر گرفته شده است [۴]. میله های موجود در ساختار قلب این راکتور از یک لایه استیل (AISI-304) با ارتفاع 72cm و قطر خارجی 3.73 cm تشکیل شده است که در دو انتهای آن دو نگهدارنده قرار دارد (شکل ۲ الف) و سوخت به صورت آلیاژ (U-Zr-H) درون یک محفظه استوانه ای شکل قرار می گیرد. در داخل محفظه سوخت یک میله از جنس زیرکونیوم قرار دارد و در دو انتهای بالا و پایین محفظه سوخت از گرافیت استفاده شده است. برای سایر میله های موجود در قلب راکتور ساختاری مشابه با ساختار



میله های سوخت اما با مواد مرتبط در نظر گرفته شده است. در این راکتور ماده هدف مورد استفاده در فرآیند تلاشی در یک ساختار مخروطی شکل قرار می گیرد (شکل ۲ ب).

شکل ۱: طراحی از مقطع استوانه ای قلب شکل ۲ الف، ساختار میله سوخت شکل ۲ ب، ساختار هدف راکتور TRIGA RC1

دو ساختار متفاوت برای قلب راکتور Triga RC1 وجود دارد که عبارتند از [۵]:

۱. حالت critical core: در این حالت مقدار ضریب تکثیر برابر با یک است ($k_{eff}=1$) و ساختار قلب شامل: تعداد 108 میله سوخت با غنای 20%، سهمیله کنترل (B4C)، دوازده میله گرافیت و یک میله regulation می باشد.

⁵hole



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۲. حالت subcritical core: برای این حالت مقدار ضریب تکثیر برابر با 0.98 است ($k_{eff}=0.98$). ساختار قلب مربوط به این حالت مشابه با حالت بحرانی است با این تفاوت که میله‌های سوخت واقع در حلقه B و میله‌های کنترل موجود در حلقه C حذف می‌شوند. در واقع در این حالت تعداد ۱۰۲ میله سوخت در ساختار قلب راکتور وجود دارد.

۳. روش کار

در این تحقیق از کد mcnpX برای شبیه‌سازی و انجام محاسبات استفاده شده است. این کد یک ابزار بسیار قدرتمند در شبیه‌سازی‌های هسته‌ای است که قابلیت ترابرد ذراتی همچون نوترون و پروتون را تا انرژی‌های بسیار بالا از مرتبه چند GeV دارد و در آن بسیاری از برهم‌کنش‌هایی که در راکتورهای واقعی برای ذرات اتفاق می‌افتد در نظر گرفته می‌شود [۶].

در بخش اول از چهار عنصر سنگین شامل: سرب، جیوه، تانتالیم و تنگستن به عنوان هدف در فرآیند تلاشی استفاده شد و تعداد نوترون‌های تولید شده بازای یک پروتون برای این عناصر محاسبه شد. این محاسبات برای پروتون‌هایی با انرژی 115 MeV تا 5 GeV انجام شد. برای توصیف فرآیند آبشار درون هسته‌ای و تعیین تعداد نوترون‌های تولیدی در فرآیند تلاشی از مدل bertini پیش‌بینی شده در کد mcnpX استفاده شد. در بخش دوم حساسیت پارامترهای نوترونی راکتور ADS شامل:

net neutron multiplication (M), power peaking factor ($\frac{P_{max}}{P_{ave}}$) Radial and Axial

نسبت به تغییر انرژی پروتون‌ها در خروجی شتاب دهنده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پارامتر انرژی پروتون‌ها در خروجی شتاب دهنده تغییر داده شد و پارامترهای نوترونی فوق برای پروتون‌هایی با انرژی ۱۱۵ تا ۱۴۰۰ MeV محاسبه شد. در انجام محاسبات حالت $k_{eff}=0.98$ را به عنوان حالت مرجع^۶ در نظر گرفتیم. در این محاسبات پارامتر G به صورت نسبت انرژی تولیدی حاصل از فرآیند شکافت در قلب یک راکتور ADS به انرژی ذرات باردار شتابدار فرودی (پروتون‌ها) روی هدف تعریف می‌شود. پارامتر G با رابطه (۱) بیان می‌شود [۷].

$$G = \frac{K_s \cdot E_f \cdot Y_{n/p}}{(1 - K_s) \cdot v E_p} \quad (1)$$

در این رابطه K_s ضریب تکثیر چشمه نوترون، E_f متوسط انرژی تولید شده در فرآیند شکافت، $Y_{n/p}$ تعداد نوترون‌های تولید شده در فرآیند تلاشی بازای یک پروتون با انرژی مشخص، v تعداد متوسط نوترون‌های تولید شده در فرآیند شکافت و E_p انرژی پروتون‌های تولیدی توسط شتاب دهنده است. پارامتر G_0 را به عنوان *energy constant gain* می‌شناسیم که طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$G_0 = \frac{E_f \cdot Y_{n/p}}{v E_p} \quad (2)$$

با استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توان پارامتر G_0 را بر حسب پارامتر G به صورت رابطه (۳) بیان نمود.



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$G = G_0 \frac{K_s}{1 - K_s} \quad (۳)$$

همچنین می توان پارامتر G را بر حسب توان کل قلب راکتور و توان شتاب دهنده با استفاده از رابطه (۴) بیان نمود.

$$G = \frac{P_{tot}}{P_{acc}} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) کمیت P_{tot} معرف توان کل در قلب راکتور و کمیت P_{acc} معرف توان شتاب دهنده است. برای تعیین جریان پروتون ها در شتاب دهنده از رابطه (۵) استفاده می شود.

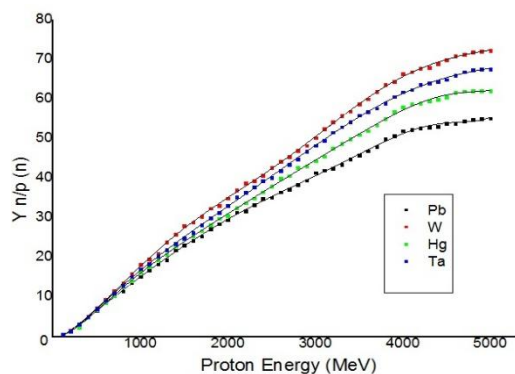
$$I_p = \frac{P_{acc}}{E_p} \quad (۵)$$

کمیت M را به عنوان net neutron multiplication می شناسیم و ارتباط آن با K_s با رابطه (۶) تعیین می شود.

$$M = \frac{1}{1 - K_s} \quad (۶)$$

۴. تحلیل و بررسی نتایج

در بخش اول برای راکتور Triga RC1 از چهار عنصر سنگین شامل: سرب، جیوه، تنگستن، تانتالیم به عنوان هدف در فرآیند تلاشی استفاده شد و تعداد نوترون های تولیدی بازای یک پروتون را برای این چهار عنصر محاسبه شد. این محاسبات برای پروتون هایی با انرژی ۱۱۵ MeV تا ۵ GeV انجام شد. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳: نمودار تعداد نوترون های تولیدی بازای یک پروتون در فرآیند تلاشی، برای چهار عنصر سرب، تنگستن، جیوه و تانتالیم در بازه انرژی ۱۱۵ MeV تا ۵ GeV.

طبق این شکل واضح است که بطور کلی با افزایش انرژی از ۱۱۵ MeV تا حدود ۵ GeV برای هر چهار عنصر تعداد نوترون های تولیدی در فرآیند تلاشی نیز افزایش می یابد. تغییر در شیب نمودار متناسب با تغییر در تعداد نوترون های تولیدی در فرآیند تلاشی است. از انرژی ۱۱۵ MeV تا ۱ GeV برای این چهار عنصر، در شیب نمودار و در نتیجه در تعداد نوترون های تولیدی بازای یک پروتون اختلاف زیادی وجود ندارد. اما با افزایش انرژی از ۱ GeV تا ۵ GeV



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مطابق شکل (۳) اختلاف در شیب نمودارها زیاد می شود طوری که تغییر در شیب نمودارها از کمترین تا بیشترین را به ترتیب برای سرب، جیوه، تانتالیم و تنگستن داریم. بنا براین از بین این چهار عنصر با توجه به شیب نمودارها، تنگستن بیشترین و سرب کمترین مقدار نوترون را در فرآیند تلاشی تولید می کنند. در نتیجه از تنگستن به عنوان عنصری که در بین این چهار عنصر بیشترین تعداد نوترون را در بازه انرژی ۱۱۵ MeV تا ۵ GeV تولید می کند، به عنوان ماده هدف برای ادامه محاسبات استفاده شد. طبق این نمودار برای این چهار عنصر تعداد نوترون های تولیدی برای یک پروتون در انرژی ۵ GeV به یک مقدار تقریباً ثابت می رسد.

در ادامه حساسیت برخی از پارامتر های نوترونی قلب راکتور Triga RC1 نسبت به تغییر انرژی پروتون ها در شتاب دهنده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از محاسبه پارامتر های نوترونی قلب راکتور برای حالت زیر بحرانی با $K_{eff}=0.98$ برای پروتون هایی با انرژی ۱۱۵ MeV تا ۱۴۰۰ MeV در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱: پارامتر های قلب زیر بحرانی راکتور TRIGA RC1 برای پروتون هایی با انرژی های در محدوده ۱۱۵ MeV تا ۱۴۰۰ MeV

Parameters	reference	Case1	Re.Dif%	Case2	Re.Dif%	Case3	Re.Dif%	Case4	Re.Dif%	Case5	Re.Dif%	Case6	Re.Dif%	Case7	Re.Dif%
E_p (Mev)	115	200	73.92	400	247.83	600	421.74	800	595.66	1000	765.57	1200	943.48	1400	1117.39
	0.468	1.453	210.48	4.632	889.75	7.691	1543.38	10.69	2184.18	14.218	2938.04	18.245	3798.51	24.8	5199.15
M	41.9	41.4	-1.2	40.2	-4.06	39.4	-5.97	38.9	-7.16	38.5	-8.12	37.6	-10.27	36.76	-12.26
	0.9761	0.9758	-0.03	0.9751	-0.11	0.9746	0.15	0.9743	-0.19	0.9740	-0.22	0.9734	0.27	0.9728	0.34
	14.23	25.81	81.37	39.56	178	42.97	201.9	43.99	209.14	46.46	226.49	48.3	239.42	55.07	289.99
	0.35	0.64	82.85	1.01	188.57	1.12	220	1.16	231.423	1.24	254.28	1.32	277.14	1.54	340
I_p (mA)	0.13	0.048	-63.07	0.0124	90.46	0.0075	94.23	0.0052	96	0.004	97.2	0.003	97.69	0.0026	-99.81
P_{acc} (KW)	14.95	9.6	-36.18	4.96	-66.95	4.54	-69.64	4.16	-71.83	4	-72.44	3.6	-73.11	3.64	-75.66

طبق داده های این جدول افزایش انرژی پروتون ها از ۱۱۵ تا ۱۴۰۰ MeV موجب می شود که:

۱. مقدار $\% \text{Relative Difference}$ برای پارامتر های G و $Y_{n/p}$ به ترتیب به مقدار $\% 5199.15$ و $\% 289.99$ افزایش می یابد.

۲. مقدار $\% \text{Relative Difference}$ برای پارامتر های جریان (I_p) و توان (P_{acc}) شتاب دهنده بترتیب به مقدار $\% 99.81$ و $\% 75.66$ کاهش می یابد.

۵. نتیجه گیری

در راکتور تحقیقاتی Triga RC1 به عنوان یک راکتور ADS از چهار عنصر سنگین سرب، تنگستن، جیوه و تانتالیم به عنوان ماده هدف استفاده شد و با رسم نمودار تعداد نوترون های تولید شده برای انرژی های مختلف، نتیجه گرفتیم که تنگستن مناسب ترین هدف است زیرا از بین این چهار عنصر بیشترین تعداد نوترون



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان

تولیدی در فرآیند تلاشی مربوط به این عنصر است. بنابراین انتخاب عنصر مناسب در فرآیند تلاشی که بتواند بازای پروتون‌هایی با انرژی مشخص، تعداد نوترون بیشتری تولید نماید بسیار مهم است. همچنین حساسیت برخی از پارامترهای نوترونی قلب یک راکتور ADS نسبت به تغییر انرژی پروتون‌ها به عنوان یکی از پارامترهای مهم شتاب دهنده بررسی شد. نتیجه گرفتیم افزایش انرژی پروتون‌ها در شتاب دهنده از 115 MeV تا 1400 MeV موجب افزایش بهره وری قلب راکتور و کاهش توان و جریان مورد نیاز در شتاب دهنده می‌شود. بنابراین بررسی حساسیت پارامترهای نوترونی قلب راکتور نسبت به تغییر برخی از پارامترهای شتاب دهنده، در طراحی یک راکتور ADS اهمیت دارد، زیرا با در نظر گرفتن این بررسی‌ها می‌توان با یک شتاب دهنده با حداقل توان و جریان ممکن بیشترین بهره وری را در قلب راکتور به همراه داشته باشیم. بررسی این موضوع از این نظر دارای اهمیت است که ساخت شتاب دهنده از لحاظ فنی مشکلی از لحاظ اقتصادی نیز گران است.

مراجع

- [۱] H. Nifenecker, S. David, J. Loiseaux, and O. Meplan, "Basics of accelerator driven subcritical reactors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 463, pp. 428, 2001.
- [۲] H. Nifenecker, O. Meplan, and S. David, *Accelerator driven subcritical reactors*: CRC Press, 2010.
- [۳] C. D. Bowman, "Accelerator-driven systems for nuclear waste transmutation," *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 48, pp. 519-560, 1998.
- [۴] C. Rubbia, M. C. N. Burgio, C. C. A. D'Angelo, A. Dorado, A. Festini, S. Monti, et al., "Preliminary Neutronic Analyses of the TRIGAADS Demonstration Facility," *Nuclear Science and Engineering (NSE)*, vol. 148, pp. 103-123, 2002.
- [۵] C. Rubbia, "TRADE final feasibility report," *ENEA, March*, 2002.
- [۶] D. B. Pelowitz, "MCNPXTM user's manual," *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos*, 2005.
- [۷] M. Hassanzadeh and S. Feghhi, "Sensitivity analysis of core neutronic parameters in accelerator driven subcritical reactors," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 63, pp. 228-232, 2014.