



رهیافتی برای انتخاب چشمه فوتونوترون مناسب با استفاده از پرتو الکترون انرژی بالا در راکتورهای ADS

نقیسه یزدانی^(۱) - محمد مهدی فیروزآبادی*^(۱) - مهدی زنگیان^(۲)

^۱ دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک

^۲ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده:

انتخاب نوع هدف و طراحی چشمه مناسب نوترون در بهره راکتور تاثیر به سزایی دارد، لذا در این مقاله به طراحی و امکان‌سنجی استفاده از یک سیستم کوچک مبتنی بر الکترون Linac برای راکتور هسته‌ای زیر بحرانی ADS پرداخته شده است. محاسبات مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX انجام شده تا فوتونوترون بهینه برای الکترون فرودی با انرژی‌های ۲۰-۱۵۰ MeV روی اهداف استوانه‌ای W، U، Ta و Pb با ابعاد مختلف حاصل شود. در این تحقیق همچنین بررسی جامعی بر روی ایزوتوپ‌های موجود در طبیعت با استفاده از دیتابیس کتابخانه ENDF2009 در کد JANIS صورت گرفته است. در انرژی ۱۰۰ MeV الکترون فرودی، چشمه نوترون با شار $3/24 \times 10^{14}$ (n/s/MA) بدست آمد که این تعداد نوترون برای استفاده در راکتورهای ADS به عنوان چشمه خارجی سیستم و بهره‌گیری جهت تبدیل زباله‌های هسته‌ای در راکتور قابل استفاده می‌باشند.

کلمات کلیدی: فوتونوترون، پرتو الکترون، بهینه‌سازی، راکتور مبتنی بر شتابدهنده، تبدیل

An approach to select the appropriate photonutron source using high energy electron beam for ADS reactor

Yazdani, Nafise¹; Firoozabadia, Mohammad Mehdi*¹; Zangian, Mehdi²

¹ University of Birjand, Faculty of Science, Physics Department

²Shahid Beheshti University, Nuclear Engineering Faculty, Reactor Department

Abstract:

The selection of the target type and the design of a proper neutron production source have an influence on the efficiency of the reactor. In this paper the design and feasibility of an electron-LINAC-based small-scale system for usage in accelerated driven nuclear subcritical reactor (ADS) has been studied. Monte Carlo calculations have been performed using MCNPx code to optimize the photo-neutron yield for different electron beam energies of 20-150 MeV impinging on U, W, Ta and Pb cylindrical targets with various dimensions. Also in this study, a comprehensive review of isotopes in nature was carried out using the ENDF2009 library database contained in the JANIS code. At incident



electron beam energy of 100MeV, a neutron source of $\sim 3.24 \times 10^{14}$ (n/s/MA) has been obtained, which is highly applicable for using in ADS reactors as external neutron source and nuclear waste transmutation.

Keywords: Photoneutrons; electron beam; optimization; accelerator driven systems; transmutations.

مقدمه:

راکتورهای هسته‌ای مبتنی بر شتابدهنده ADS، از جمله راکتورهای نسل جدید به منظور تولید انرژی به همراه امکان تبدیل زباله‌های هسته‌ای می‌باشند، که بطور قابل توجهی مورد استقبال کشورهای مختلف قرار گرفته‌اند [۱-۴]. راکتورهای ADS به دلیل استفاده از شتابدهنده‌ها، کنترل پذیری خوب و در نتیجه ایمنی بالایی دارند. روش متداول برای تولید چشمه نوترون خارجی در راکتورهای ADS استفاده از شتابدهنده‌های پروتون و برهمکنش تلاشی می‌باشد که عمدتاً هزینه ساخت بالایی دارند [۵].

در این تحقیق امکان استفاده از شتابدهنده‌های الکترونی به جای شتابدهنده‌های پروتونی و استفاده از برهمکنش‌های (e, γ) و (γ, n) برای تولید نوترون [۶] در راکتورهای ADS مورد بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی راکتورهای مبتنی به شتابدهنده الکترونی اولین گام ایجاد چشمه نوترون مناسب است. در چشمه نوترون با شتابدهنده الکترونی، به الکترون‌ها توسط یک شتابدهنده شتاب داده شده و سپس باریکه الکترون را روی هدفی می‌تابانند، وقتی الکترون‌های پر انرژی به مواد هدف برخورد می‌کنند، طیف پیوسته‌ای از فوتون‌های تابش ترمزی تولید می‌شود. فوتون‌های پر انرژی تولید شده با هسته‌های مواد هدف برهمکنش می‌کنند و در نتیجه نوکلئون‌ها گسیل می‌شوند [۷].

تعداد نوترون‌های تولیدی بسته به انرژی الکترون فرودی، نوع هدف انتخابی و ساختار هندسی هدف متفاوت می‌باشد. لذا بررسی این موضوع که از چه گستره انرژی و چه ماده‌ای و با چه ابعادی به عنوان هدف استفاده شود تا بیشترین بهره‌وری را داشته باشیم از اهمیت بالایی برخوردار است. عموماً از عناصر تنگستن، تانتالیوم و سرب به شکل یک استوانه به عنوان چشمه نوترون استفاده شده است [۸] و بررسی جامعی بر روی تمام عناصر صورت نگرفته است.

در مقاله حاضر، برای دستیابی به فوتون‌نوترون بهینه، برهمکنش (e, n) به دو بخش (e, γ) و (γ, n) تقسیم شده تا بهترین مبدل‌های الکترون-گاما و گاما-نوترون به صورت جداگانه یافت شوند و نهایتاً هندسه انتخابی ترکیبی از دو ماده با ابعاد



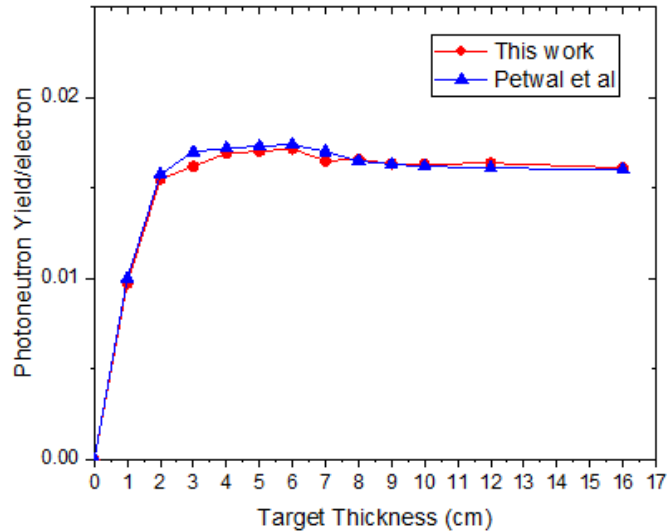
مشخص باشد. همچنین از دیتابیس کتابخانه ENDF2009 موجود در کد JANIS، سطح مقطع یک گروهی^۱ تولید نوترون را برای ^{106}C ایزوتوپ موجود در کتابخانه بررسی کرده و بر اساس آن عنصر هدف بهینه پیشنهاد شده است. سپس با استفاده از کد MCNP[9] ابعاد هدف انتخابی بهینه و شار نوترون خروجی محاسبه شده است. از آنجا که به دنبال تولید نوترون مورد نیاز برای راکتورهای زیربحرانی می‌باشیم، با توجه به نوع سوخت در این راکتورها نیازی به تولید نوترون با انرژی بالا نداریم بلکه تامین نوترون حرارتی اولویت تحقیق می‌باشد.

روش کار:

برای طراحی یک چشمه فوتونوترون بهینه، مراحل زیر ارزیابی شده است: - بررسی اثر تغییرات شعاع، ضخامت، جنس و انرژی بر روی برهمکنش (e, γ) - استخراج طیف گاما برای حالت بهینه (e, γ) - پردازش داده با استفاده از طیف بهینه (e, γ) و مشخص کردن مواد بهینه - بررسی اثر تغییرات شعاع، ضخامت، جنس و انرژی بر روی برهمکنش (γ, n) - بهره و طیف نوترون برای چشمه بهینه. برای مقایسه‌ی نتایج با کارهای دیگران، یک هدف تانتالیوم استوانه‌ای با شعاع ۳ cm و ضخامت ۱ cm الی ۱۶ cm تحت تابش الکترون‌های ۵۰ MeV، مطابق نتایج موجود در مجله پرامانا^۲ قرار گرفت [۸]. هر دو نتیجه در شکل ۱ آورده شده و نشان می‌دهد که نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در توافق خوبی هستند؛ بنابراین می‌توان به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته اعتماد کرد.

^۱one group cross-section

^۲PRAMANA

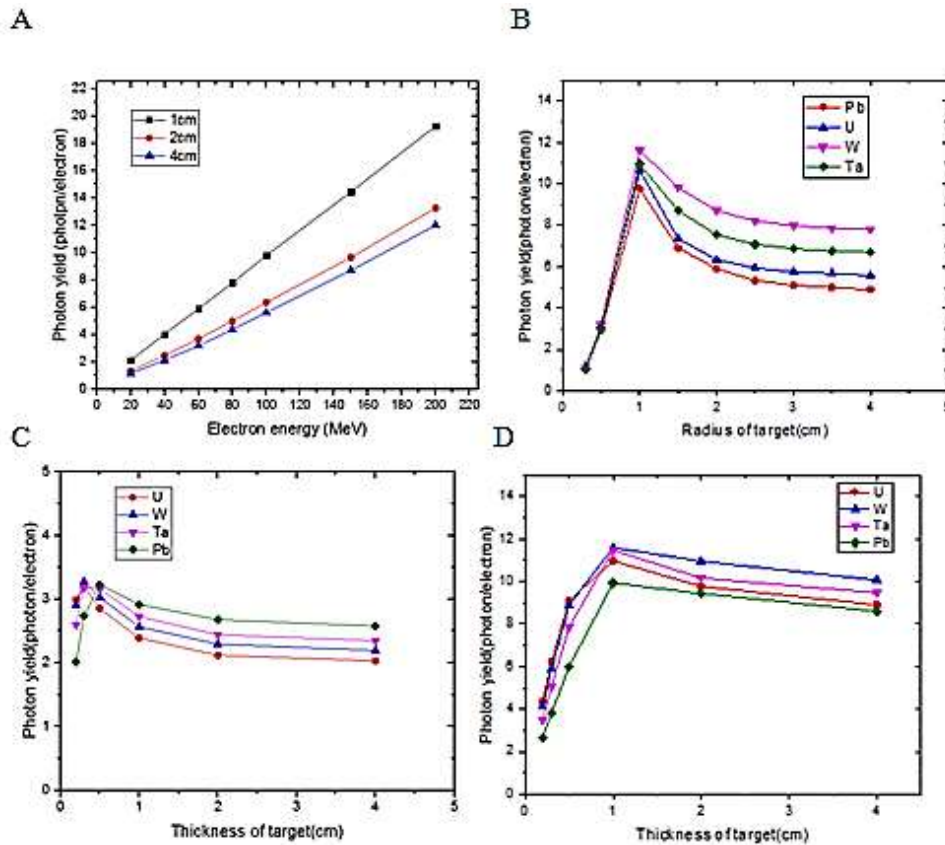


شکل (۱) مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری برای هدف تانتالیوم [۸]

بررسی اثر تغییرات شعاع، ضخامت، جنس و انرژی برای برهمکنش (e,ν)

مبدل الکترون- گاما بایستی عنصری با عدد اتمی و چگالی بالا، نقطه ذوب بالا و رسانایی حرارتی خوبی باشد بر این اساس عناصر اورانیوم، تنگستن، تانتالیوم و سرب را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

ابتدا استوانه‌ای از جنس اورانیوم، تنگستن، تانتالیوم و سرب به منظور تعیین شعاع بهینه تحت تابش پرتو الکترونی MeV ۲۰-۲۰۰ قرار گرفت و شار فوتون حاصل محاسبه شد. شار فوتون تولید شده به صورت تابعی از انرژی پرتو الکترون برای اورانیوم در شکل ۲A آورده شده است. تمام محاسبات برای 10^6 ذره انجام شد و خطای آماری نسبی کمتر از ۳ درصد بود.

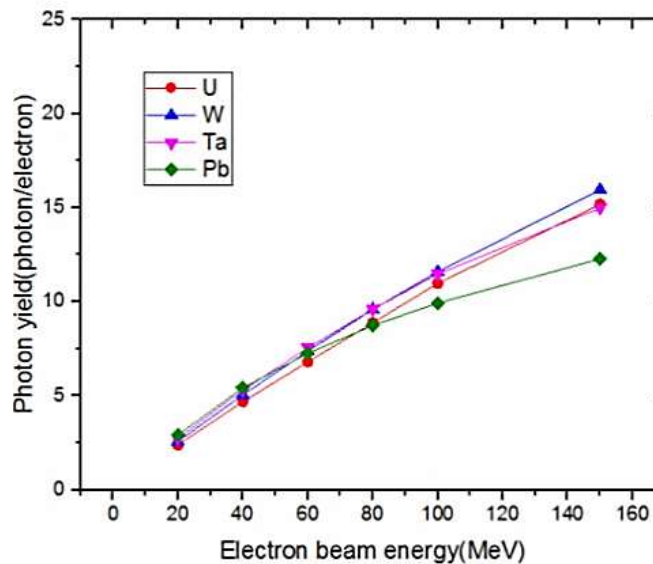


شکل (۲) فوتون حاصل از عناصر مختلف برحسب تابعی از انرژی، شعاع و ضخامت

همان‌طور که در شکل ۲B دیده می‌شود در شعاع ۱ cm بیشترین تعداد فوتون بدست آمد لذا شعاع ۱ cm به عنوان شعاع بهینه برای مبدل (e, γ) انتخاب می‌شود.

در مرحله بعد شعاع را ثابت (۱ cm) در نظر گرفته و تعداد فوتون به ازای مقادیر ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ برای ضخامت هدف بررسی شد. فوتون حاصل از اهداف مختلف به صورت تابعی از ضخامت در انرژی‌های ۱۰۰ MeV و ۲۰ MeV الکترون فرودی در شکل‌های ۲C و ۲D آورده شده است. در محدوده انرژی پایین ۲۰ MeV ضخامت حدود ۰/۳ cm ضخامت مورد نظر در تولید فوتون می‌باشد، که این رنج انرژی بیشتر در حوزه پزشکی مثل طراحی شتاب‌دهنده‌های پزشکی و تولید نوترون برای استفاده در BNCT کاربرد دارد [۶]، و در محدوده انرژی ۱۰۰ MeV که مورد نظر ماست ضخامت ۱ cm انتخاب می‌گردد. با مقایسه فوتون حاصل از چهار عنصر فوق با شعاع و ضخامت ۱ cm طبق شکل ۳ به

ترتیب تنگستن، تانتالیوم، اورانیوم و سرب بیشترین تعداد فوتون را تولید می‌کنند. همچنین دیده می‌شود که روند تغییرات انرژی تقریباً خطی است و پس از انرژی ۱۰۰ MeV شیب تغییرات اندکی کم می‌شود لذا انرژی ۱۰۰ MeV را انرژی بهینه در نظر می‌گیریم.

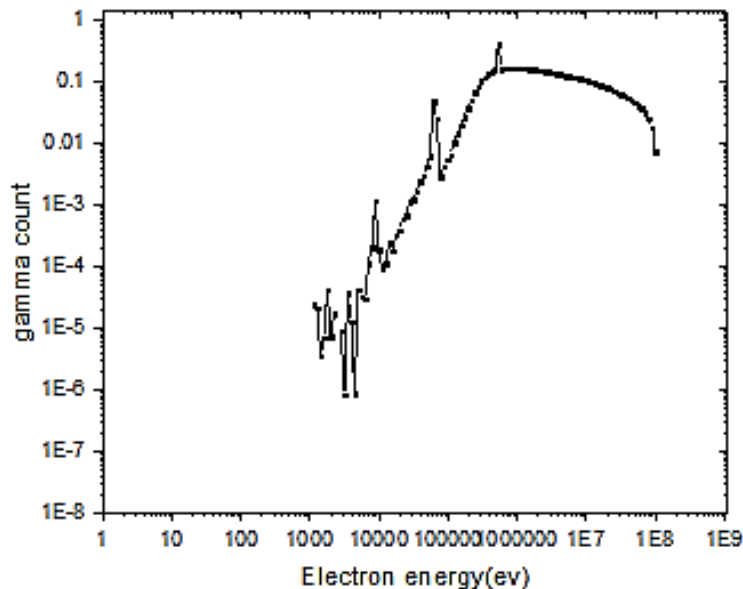


شکل (۳) فوتون حاصل برحسب انرژی الکترون فرودی برای عناصر مختلف با شعاع و ضخامت ۱ cm

با توجه به خواص فیزیکی تنگستن همچون عدد اتمی بالا، چگالی بالا (19.25 g/cm^3)، درجه حرارت بالا (نقطه ذوب 3273°C) و هدایت دمایی خوب نهایتاً تنگستن به عنوان بهترین مبدل $e-\gamma$ در نظر گرفته می‌شود.

استخراج طیف گاما برای برهمکنش (e, γ)

با استفاده از کد MCNPX طیف گامای بهینه حاصل از عنصر تنگستن با شعاع و ضخامت ۱cm تحت تابش پرتو الکترون ۱۰۰MeV مطابق شکل ۴ محاسبه شد.



شکل (۴) طیف گامای حاصل از تنگستن تحت تابش الکترون‌های ۱۰۰ MeV

با استفاده از این طیف مقطع میکروسکوپی یک تولید نوترون محاسبه شده و سپس سطح مقطع را یک

گروهی کرده و بیشترین سطح مقطع ماکروسکوپی یک گروهی تولید نوترون برای عناصر مختلف بدست آمد.

پردازش داده با استفاده از طیف بهینه (e, ν) و مشخص کردن مواد بهینه

از طیف گامای بهینه حاصل در شکل ۴ و کد JANIS برای بررسی جامع بر روی تمام ایزوتوپ‌های موجود استفاده شد تا بهترین مبدل ν -n معرفی شود. با استفاده از کتابخانه Endf 2009 موجود در کد JANIS سطح مقطع میکروسکوپی یک گروهی تولید نوترون برای ^{106}W ایزوتوپ موجود در کتابخانه، سپس سطح مقطع ماکروسکوپی ایزوتوپ‌های طبیعی و نهایتاً سطح مقطع ماکروسکوپی یک گروهی تولید نوترون برای عناصر طبیعی محاسبه شد. نتایج حاصل در جدول ۱ آورده شده‌اند.



جدول (۱) سطح مقطع ماکروسکوپیک یک گروهی تولید نوترون طیف گامای حاصل از تنگستن با پرتو الکترون MeV ۱۰۰ برای عناصر طبیعی

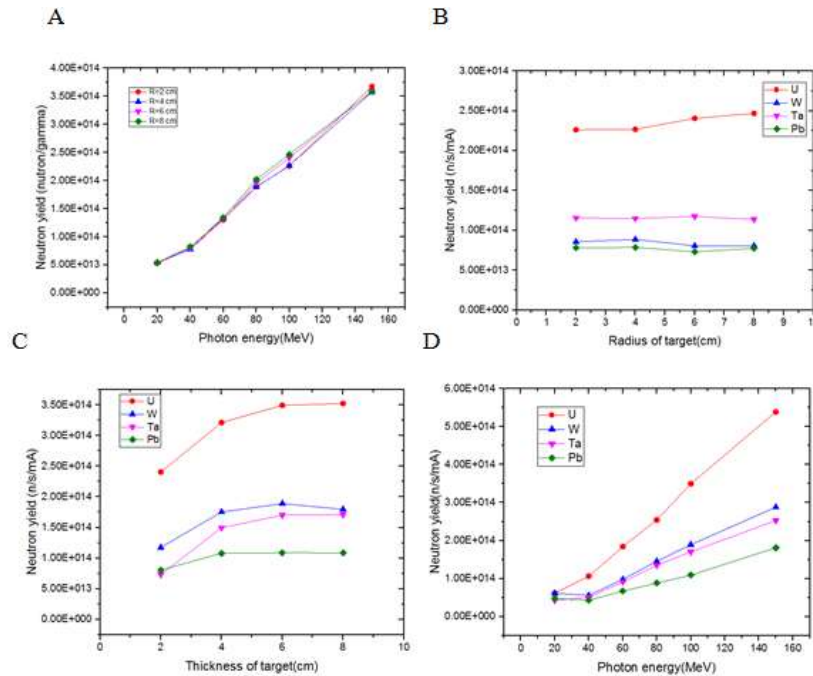
Pt	0.008144	Ho	0.002221	Yb	0.001597	V	0.000867	Na	4.89E-05
Os	0.005514	Lu	0.002195	In	0.001591	Zn	0.000795	Al	4.73E-05
Re	0.005391	Bi	0.002188	Te	0.001538	Cu	0.000793	Li	4.32E-05
Ir	0.005341	Er	0.002068	Sb	0.001428	Ba	0.000771	S	3.29E-05
Hg	0.004923	Mo	0.002037	La	0.001243	Y	0.000628	Si	3.17E-05
U	0.004858	Tm	0.002031	Pr	0.001193	Ti	0.000618	K	2.15E-05
W	0.004535	Dy	0.001961	Eu	0.001185	Br	0.000586	C	1.95E-05
Au	0.004356	Cd	0.001938	As	0.001141	Ni	0.000523	Ca	1.41E-05
Ta	0.003949	Tb	0.001899	Co	0.001083	Sr	0.000466	Xe	1.27E-06
Th	0.003294	Gd	0.001823	Ga	0.001038	Cs	0.000449	Kr	7.46E-07
Hf	0.003094	Ce	0.00182	Zr	0.001037	Sc	0.000298	Ar	3.79E-07
Rh	0.003006	Sm	0.001801	Cr	0.001023	Be	0.000271	Cl	1.63E-07
Pd	0.002692	Se	0.001797	Ge	0.00102	Rb	0.000271	F	8.35E-08
Ru	0.002585	Nb	0.001739	I	0.000997	B	0.000151	Ne	2.08E-08
Tl	0.002532	Nd	0.001657	Fe	0.000981	Mg	7.66E-05	N	1.41E-08
Pb	0.002416	Sn	0.001609	Mn	0.000884	p	7.64E-05	O	3.44E-09

با بررسی خواص فیزیکی عناصر از جمله نقطه ذوب، رسانایی حرارتی و همچنین فراوانی عناصر در طبیعت نهایتاً اورانیوم، تنگستن، تانتالیوم، توریوم و سرب به عنوان کاندید مناسب عنصر هدف انتخاب گردیدند.

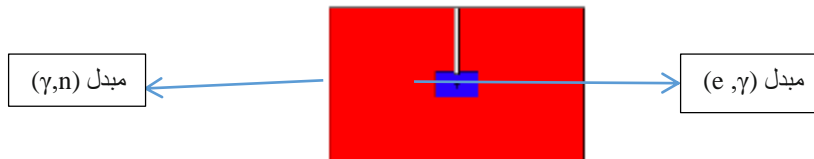
بررسی اثر تغییرات شعاع، ضخامت، جنس و انرژی برای برهمکنش (γ, n)

در این مرحله ابتدا با ضخامت ثابت ۲ cm شعاع هدف را تغییر داده و پس از انتخاب شعاع بهینه ضخامت را به ازای مقادیر مختلف بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از تغییرات شعاع و ضخامت هدف بر حسب انرژی فوتون فرودی برای عناصر مختلف در شکل‌های ۵A، ۵B و ۵C آورده شده است. همچنین دیده می‌شود که اورانیوم بیشترین نوترون را تولید می‌کند اما بهتر است به عنوان چشمه تولید نوترون در راکتور استفاده نشود. لذا عنصر بعدی یعنی تنگستن و بعد تانتالیوم

با شعاع و ضخامت ۶ cm به عنوان مبدل (γ, n) معرفی می‌شود. پس از انتخاب دو مبدل، هندسه پیشنهادی به صورت شکل ۶ می‌باشد. برای اینکه نتیجه برگشت به عقب فوتون به حداقل برسد یک حفره در مرکز هدف در نظر گرفته شده است. از آنجا که ابعاد این حفره می‌تواند تاثیر به سزایی در مقدار شار خروجی نوترون داشته باشد لذا تغییرات شعاع حفره نیز ارزیابی شده است و شعاع ۱ mm برای حفره پیشنهاد می‌شود. نتایج اثر تغییر شعاع حفره برای تولید نوترون بر حسب انرژی الکترون فرودی در شکل ۷ آورده شده است.



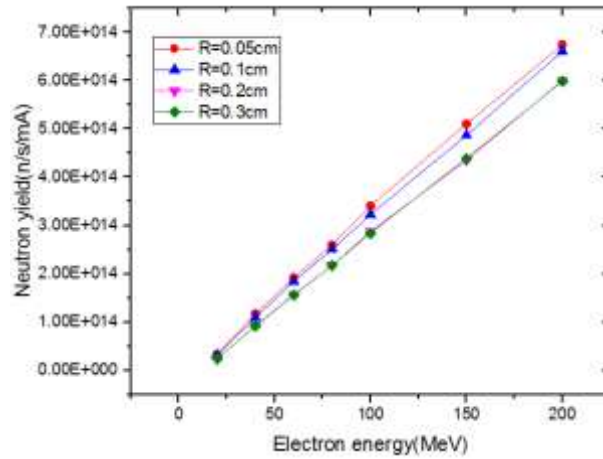
شکل (۵) نوترون حاصل از عناصر مختلف بر حسب تابعی از انرژی، شعاع و ضخامت



شکل (۶) هندسه بهینه چشمه فوتونوترون



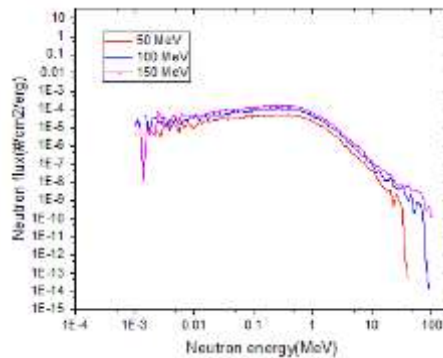
به این ترتیب هندسه نهایی به صورت شکل ۶ معرفی می‌شود که یک چشمه فوتونوترون با شار نوترون (n/s/MA) $10^{14} * 3/24$ در انرژی ۱۰۰ MeV می‌باشد.



شکل (۷) اثر تغییر شعاع حفره برای تولید نوترون بر حسب انرژی الکترون فرودی

بهره و طیف نوترون برای چشمه بهینه

طیف نوترون این چشمه به ازای انرژی‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ MeV الکترون فرودی در شکل ۸ نشان شده است، با استفاده از این طیف مقادیر بهره انرژی ماکزیمم، انرژی میانگین و فوتونوترون حاصل محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۸) طیف انرژی فوتونوترون تولید شده توسط هندسه بهینه



جدول (۲) پارامترهای محاسبه شده با استفاده از طیف نوترون

انرژی الکترون (MeV)	ماکزیمم انرژی	انرژی ماکزیمم	میانگین انرژی	نوترون حاصل
۵۰	۴۰/۱۷	۰/۷۴۳	$۹/۰۲ e^{-۰۱}$	$۱/۳۸ e^{-۰۲}$
۱۰۰	۸۹/۲۲	۰/۷۴۳	$۹/۴۱ e^{-۰۱}$	$۲/۹۸ e^{-۰۲}$
۱۵۰	۱۳۳/۳	۰/۷۴۳	$۹/۹ e^{-۰۱}$	$۴/۴۶ e^{-۰۲}$

ماکزیمم انرژی: بیشترین انرژی الکترون برای تولید نوترون به طوری که شار نوترون به ازای انرژی‌های بیشتر از آن صفر خواهد بود. انرژی ماکزیمم: انرژی نوترون تولیدی با بیشترین شار (نقطه پیک در شکل ۸). علاوه بر این‌ها دیگران در کارهای خود از مدل‌های فیزیکی مختلف برای بهینه کردن شار نوترون استفاده نکرده‌اند. در این مقاله با استفاده از کارت Phys موجود در کد MCNPX همه حالات ممکن کارت LEA بررسی شد و نهایتاً با استفاده از مدل intermediat مقدار شار نوترون از $۳/۱۰^{۱۴} \times ۲۳$ (n/s/MA) به $۳/۶۳ \times ۱۰^{۱۴}$ در انرژی ۱۰۰ MeV الکترون افزایش یافت. این مقدار شار بدست آمده می‌تواند در راکتورهای نسل جدید ADS برای تبدیل زباله‌های هسته‌ای مناسب باشد. با قرار گرفتن این چشمه در مرکز قلب راکتور بسته به نوع راکتور انتخابی می‌توان از کند کننده مناسب نیز استفاده کرد.

نتایج:

با انتخاب یک چشمه فوتونوترون مناسب (در مقایسه با چشمه‌های نوترون با شتابدهنده‌های پروتونی) می‌توان تا حد زیادی از هزینه‌های لازم کاست و علاوه بر این از ایمنی بالاتر و بیشتر در دسترس بودن نسبت به چشمه با شتاب‌دهنده‌های پروتونی بهره برد. در مقاله حاضر یک چشمه فوتونوترون با پرتو الکترون ۱۰۰ MeV برای استفاده در راکتور ADS طراحی شد. بر اساس نتایج حاصل شعاع و ضخامت ۱ cm برای مبدل الکترون-گاما و شعاع و ضخامت ۶ cm برای مبدل گاما-نوترون پیشنهاد شد.

مراجع:

- [1] j. Marques and Management, "Evolution of nuclear fission reactors: Third generation and beyond", **Energy Conversion**, vol. 51, no. 9, pp. 1774-1780, 2010.



- [2] Y. Kim, W.-S. Park, and R. Hill, "Core Design Characteristics of the HYPER System", in **at 7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation**, Jeju, Korea, 2002.
- [3] Y. Gohar and D. L. Smith, "YALINA facility a sub-critical Accelerator-Driven System (ADS) for nuclear energy research facility description and an overview of the research program (1997-2008) ", **Argonne National Lab.(ANL)**, Argonne, IL (United States)2010.
- [4] H. A. Abderrahim, P. Baeten, D. De Bruyn, J. Heyse, P. Schuurmans, and J. P. N. Wagemans, "MYRRHA, a multipurpose hybrid research reactor for high-end applications" **Nuclear Physics News**, vol. 20, no. 1, pp. 24-28, 2010.
- [5] D. Ridikas, H. Safa, and M. Giacri, "Conceptual study of neutron irradiator driven by electron accelerator", in **7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product P&T (NEA/OCDE)**, Jeju, Korea, 14-16, 2002.
- [6] F. Rahmani, M. Shahriari, "Hybrid photoneutron source optimization for electron accelerator-based BNCT", **Nuclear Instruments**, vol. 618, no. 1-3, pp. 48-53, 2010.
- [7] G. Kim et al., "Measurement of photoneutron spectrum at Pohang Neutron Facility", **Nuclear Instruments**, vol. 485, no. 3, pp. 458-467, 2002.
- [8] V. Petwal, V. Senecha, K. Subbaiah, H. Soni, and S. Kotaiah, "Optimization studies of photo-neutron production in high-Z metallic targets using high energy electron beam for ADS and transmutation", **pramana**, vol. 68, no. 2, pp. 235-241, 2007.
- [9] J. S. Hendricks et al., "MCNPX 2.6. 0 Extensions," **Los Alamos National Laboratory**, 2008.