



طراحی و بهینه‌سازی هدف فوتونوترون به‌منظور استفاده در رآکتورهای نسل جدید واداشته توسط شتاب‌دهنده

ساره ارحمی^۱، محمد مهدی فیروزآبادی^{۱*}، زهره غلامزاده^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، صندوق پستی: ۹۷۱۷۴۳۴۷۶۵، بیرجند - ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران-ایران

*Email: mfiroozabadi@birjand.ac.

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۱

چکیده

رآکتورهای ماژولار کوچک SMR و واداشته توسط شتاب‌دهنده ADS به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، توسط بسیاری از پژوهش‌گران در سراسر جهان مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. در این پژوهش، هدف فوتونوترونی مناسب برای رآکتور ماژولار کوچک هولوس با استفاده از کد MCNPX ۲٫۶ طراحی و بهینه شد. بردهای تقریب کندشدگی پیوسته (CSDA) الکترون‌های عبوری از تانتالیم، تنگستن، جیوه، سرب و سرب-بیس‌موت بررسی شدند. آهنگ تولید و نشت نوترون و فوتون، مقدار ذخیره و انباشت گرمای حاصل از نوترون و فوتون در فرایند بمباران الکترونی اهدافی از جنس تانتالیم، تنگستن، جیوه، سرب و سرب-بیس‌موت با انرژی‌های الکترونی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ MeV محاسبه شدند. موارد دیگری مانند بهینه‌سازی ابعاد هدف فوتونوترونی به ازای الکترون‌های ۲۰ و ۲۰۰ MeV و انتخاب انرژی بهینه الکترون‌های فرودی برای هدف فوتونوترونی با ابعاد بهینه نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

کلیدواژه‌ها: رآکتور ماژولار کوچک، رآکتور زیربحرانی واداشته توسط شتاب‌دهنده، هدف فوتونوترونی، برد CSDA، کد MCNPX ۲٫۶

Design and optimization of photoneutron target for use in a new generation of accelerator driven subcritical reactors

S. Arhami¹, M. M. Firoozabadi^{1*}, Z. Gholamzadeh²

1. Department of Physics, Faculty of Science, University of Birjand, P.O.BOX: 9717434765, Birjand - Iran

2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

Research Article

Received 5.6.2020, Accepted 22.8.2020

Abstract

Because of many special benefits of the Small Modular Reactors (SMRs) and the Accelerator Driven Subcritical Reactors (ADSRs), they are subject of a large number of studies all over the world. In the present work, the ADS photoneutron target for Holos reactor was designed and optimized by using MCNPX2.6 code. The Continuous Slowing Down Approximation (CSDA) ranges of passing electrons through tantalum, tungsten, mercury, lead and lead-bismuth were investigated. The production and leakage rates for neutrons and photons, and therefore, the deposited heat from neutrons and photons were calculated considering the electron beam bombardment of tantalum, tungsten, mercury, lead and lead-bismuth targets at beam energies of 100–1000 MeV. Other factors such as the optimization of photoneutron target dimensions for 20 and 200 MeV electron beams, and choosing of the optimal energy of incident electrons for the optimized photoneutron target were examined.

Keywords: Small modular reactor, Accelerator driven sub-critical reactor, Photoneutron target, CSDA range, MCNPX2.6 code



۱. مقدمه

در رآکتورهای واداشته با شتاب‌دهنده پروتونی و انرژی‌های 0.2 GeV تا 1.6 GeV، نشان داده شد که شکل هدف در میزان نوترون تولیدی مؤثر است و انباشت گرما نزدیک به سطح هدف تحت تابش پروتون‌های با انرژی کم‌تر از 1 GeV، به دلیل غلبه حضور قله براگ، افزایش یافته و توزیع گرما در تمام حجم هدف به ازای پروتون‌های با انرژی 1 GeV، هموارتر است [۹].

مطالعات گسترده‌ای در زمینه بررسی اهداف تلاشی نشان می‌دهند که برای دستیابی به شار نوترونی مطلوب و توزیع حرارتی مناسب در هدف تلاشی، به باریکه‌های پروتونی با انرژی بالا (1 GeV) نیاز است. بنابراین در برخی از کاربردهای پزشکی و صنعتی طراحی چشمه نوترون خارجی واداشته با شتاب‌گر، از شتاب‌دهنده‌های الکترونی به جای نوع پروتونی آن استفاده می‌شود؛ چرا که شتاب‌دهنده الکترونی کوچک‌تر، منجسم‌تر و دارای هزینه ساخت کم‌تری است و از این‌رو عملکرد قابل اطمینان‌تری خواهد داشت. هم‌چنین با توجه به انرژی الکترون، مقدار جریان شتاب‌دهنده قابل تنظیم خواهد بود [۶].

در پژوهش‌های انجام شده روی قلب رآکتور تریگا زیربحرانی ENEA-RC-1-Casaccia، از یک باریکه الکترونی 1 mA با انرژی 25 MeV، توان 25 MW و قطر پهنای باریکه 1 cm استفاده شده است. در این مطالعه با به‌کارگیری پیکربندی‌ها و مواد مختلف برای هدف فوتونوترونی نشان داده شد که به ازای k_{eff} کم‌تر از 0.98 ، توان قلب به کم‌تر از 50 kW می‌رسد [۱۰]. در سال 2006 میلادی و در پژوهش‌هایی که بر روی قلب زیربحرانی TRIGA-Mark-II زیر نظر آقای D.S.O'Kelly از دانشگاه تگزاس انجام گرفت، پیشنهاد استفاده از شتاب‌دهنده الکترونی 20 MeV در سیستم‌های زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده داده شد [۱۱].

در مطالعات صورت گرفته روی طراحی هدف فوتونوترونی مناسب به‌همراه شتاب‌دهنده الکترونی 18 MeV با جریان 10 mA و پهنای باریکه‌ی 1 cm نشان داده شد که سرب نسبت به اهداف فلزی سنگین انتخابی مثل تانتالیم و تنگستن، منجر به تولید نوترون بیش‌تری از مرتبه 10^{12} n/s.cm² خواهد شد [۱۲]. در پژوهشی از کشور فرانسه، طراحی مفهومی تابش‌گر نوترونی واداشته با شتاب‌دهنده الکترونی انجام گرفت و با تابش باریکه الکترون 100 MeV (توان 8 MW) روی هدف اورانیومی با غنای کم‌تر از 20% ، شار نوترون از مرتبه 10^{14} n/s.cm² تولید شد و نشان داده شد که این شتاب‌گر الکترونی می‌تواند سیستمی با k_{eff} کم‌تر از 0.8 را تحریک کند [۶]. در برخی از مطالعات انجام گرفته، از شتاب‌دهنده‌های کوچک و قابل‌حمل الکترونی با انرژی‌های زیر 50 MeV و جریان چند میلی‌آمپر در طراحی چشمه فوتونوترونی واداشته

از دهه 1950 میلادی تا به امروز، استفاده از انواع رآکتورهای هسته‌ای در مصارف صنعتی و غیرصنعتی سیر صعودی داشته است؛ به‌طوری‌که در حال حاضر بسیاری از کشورهای جهان مثل فرانسه، بخش عمده برق مصرفی خود را از این طریق تأمین می‌کنند. از سال 1993 میلادی، در کنار گروه‌های متعددی از رآکتورهای بزرگ و صنعتی، طراحی و ساخت نسل جدید رآکتورهای زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده مورد توجه قرار گرفته است. رآکتورهای زیربحرانی از سطح ایمنی بالاتری نسبت به سایر رآکتورها برخوردارند و قابلیت سوزاندن اکتینیدها و پسماندهای هسته‌ای رآکتورهای بزرگ تجاری در کنار تولید انرژی را دارند. امکان استفاده از سوخت توریم که فراوان‌تر از اورانیوم است در رآکتورهای زیربحرانی واداشته وجود دارد و فرصتی برای کشورهایی مانند هند با ذخایر عظیم توریم خواهد بود تا از این ماده به‌عنوان سوخت این رآکتورها استفاده کنند [۴-۱].

رآکتورهای زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده از سه قسمت اصلی تشکیل شده‌اند که پژوهش‌های زیادی در هریک این زمینه‌ها انجام شده است: شتاب‌دهنده ذرات باردار، هدف مورد اصابت باریکه شتاب‌دهنده و قلب زیربحرانی [۷-۵]. در رآکتورهای ADS متداول، باریکه پروتون‌های شتاب‌دار روی یک هدف تلاشی از جنس فلز سنگین قرار گرفته در قلب رآکتور زیربحرانی فرود می‌آید و نوترون‌های حاصل از این برهم‌کنش، وارد قلب زیربحرانی می‌شوند. چشمه نوترون خارجی (شتاب‌دهنده و هدف تلاشی)، کمبود نوترونی قلب زیربحرانی را جبران می‌کند، واکنش‌های زنجیره‌ای پایدار شکافت در قلب زیربحرانی رآکتور انجام می‌شوند و توان حرارتی خروجی پیوسته‌ای تولید خواهد شد؛ بنابراین هدف تلاشی از مهم‌ترین اجزا در رآکتورهای ADS است زیرا زنجیره شکافت بدون چشمه خارجی حفظ نمی‌گردد و رآکتور زیربحرانی قادر به تولید توان حرارتی نخواهد بود [۳-۱]. طی بررسی انجام شده در پژوهش‌شده رآکتور و ایمنی هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، اهداف تلاشی ساخته شده از مواد شکافت‌پذیر اورانیوم و توریم تحت تابش جریان 2 mA پروتون‌های با انرژی‌های 1 MeV تا 3 GeV قرار گرفتند و از نظر نوترونیکی بررسی شدند؛ نتایج نشان داد که بهره تولید نوترون، که یکی از مهم‌ترین پارامترها در سیستم‌های واداشته با شتاب‌دهنده به شمار می‌آید، به شدت به انرژی پروتون فرودی، شکل هندسی هدف تلاشی، ابعاد و مواد آن بستگی دارد و انرژی بهینه پروتون برای دستیابی به بهره نوترونی مناسب، بیش‌تر از 1 GeV نخواهد بود [۸]. در مطالعه انجام شده روی هدف تلاشی سرب، بیسموت و سرب- بیسموت



وقوع اختلال در عملکرد سیستم کنترل مکانیکی آن وجود خواهد داشت. با زیربحرانی شدن قلب هولوس، در صورت ایجاد خطاهای کنترلی، احتمال ایجاد حوادث هسته‌ای کاهش خواهد یافت.

هدف از این پژوهش، زیربحرانی کردن قلب هولوس با شتاب‌دهنده الکترونی و طراحی هدف فوتونوترونی مناسب برای این قلب زیربحرانی است تا چشمه نوترون خارجی (شتاب‌دهنده الکترون و هدف فوتونوترونی) بیش‌ترین شار نوترون و فوتون را گسیل کرده و رآکتور هولوس زیربحرانی شده، توان حرارتی مقرون به صرفه‌ای را تولید کند.

۲. مواد و روش‌ها

کد محاسباتی MCNPX ۲/۶ نسل جدیدی از مجموعه کدهای ترابرد ذره‌ای مونت کارلو است که اولین نسخه آن ۶۰ سال پیش در آزمایشگاه ملی Los-Alamos تولید شد. این کد محاسباتی برای ردیابی انواع ذرات بر روی طیف وسیعی از انرژی‌ها طراحی شده است و از جمله کاربردهای محاسباتی آن عبارتند از: طراحی هدف تلاشی شتاب‌دهنده، پژوهش روی چشمه‌های واداشته با شتاب‌دهنده، محاسبات رآکتوری مربوط به برناپ و غیره [۱۹]. در این پژوهش، طراحی هدف فوتونوترونی مناسب برای جای‌گیری در رآکتور زیر بحرانی شده هولوس انجام شده است و از میان شتاب‌دهنده‌های موجود، شتاب‌دهنده‌های الکترونی به‌دلیل کوچک‌تر، کم هزینه‌تر و به‌صرفه‌تر بودن انتخاب شده‌اند [۲].

هدف فوتونوترونی در قلب رآکتور زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده قرار می‌گیرد و طی برهم‌کنش باریکه شتاب‌دار الکترونی فرود آمده روی هدف فوتونوترونی از جنس فلز سنگین، نوترون‌های اولیه‌ای تولید می‌شوند که توسط قلب زیربحرانی احاطه‌کننده آن تکثیر خواهند شد. تعداد نوترون‌های اولیه تولیدی از هدف به ازای یک الکترون فرودی، به انرژی الکترون فرودی و عدد اتمی ماده هدف فوتونوترونی وابسته است [۲۰]. انتخاب اولیه مواد هدف در پژوهش حاضر، فلزات سنگین با عدد اتمی بالا مانند تنگستن، تانتالیم، سرب، جیوه و ترکیب سرب (۴۴،۵) - بیسموت (۵۵،۵) هستند.

به‌منظور دستیابی به یک جمعیت نوترونی مطلوب در قلب رآکتور، بهینه کردن ابعاد هدف فوتونوترونی نسبت به ابعاد قلب رآکتور ضروری بوده و طراحی هدف فوتونوترونی باید به گونه‌ای باشد تا بیش‌ترین نشت نوترون از هدف و بیشینه چگالی توان درون قلب رآکتور زیربحرانی، تولید شود [۵]. افزایش ابعاد هدف فوتونوترونی در بالا بردن تعداد نوترون‌های گسیلی از آن، تأثیر مستقیمی نخواهد داشت چرا که انرژی نوترون‌های تولیدی درون

استفاده شده است و شار نوترون تولیدی (از مرتبه 10^{13} n/s.cm²) برای اهداف پزشکی (BNCT) و صنعتی (تولید رادیوایزوتوپ) به‌کار برده شد [۱۶-۱۳]. در بسیاری از پژوهش‌های گذشته، روی استفاده از رآکتورهای زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده الکترونی برای تولید شار نوترونی مطلوبی که پاسخ‌گوی مصارف پزشکی و صنعتی باشد، مطالعاتی انجام شده است و فعالیتی در زمینه استفاده از این سیستم زیربحرانی برای تولید توان حرارتی به‌صرفه و مناسب (در حد چند مگاوات) وجود ندارد. با توسعه طراحی و ساخت این نوع از رآکتورهای کوچک و قابل حمل، نیاز برق بسیاری از موقعیت‌های مکانی دور از دسترس، مواقع اورژانسی قطع سراسری برق مثل سیل و زلزله، کارگاه‌های حفر معادن و یا شارژ خودروهای برقی که در آینده‌ای نزدیک وارد میدان رقابتی خودرو می‌شوند، تأمین خواهد شد.

نسل جدید رآکتورهای کوچک ماژولار، ساختار منسجمی داشته و با ابعادی به اندازه یک سوم رآکتورهای امروزی، توان خروجی کم‌تر از ۳۰۰ MW دارند. اجزای مختلف رآکتور SMR در محل کارگاه ساخته شده، با استفاده از راه‌های ارتباطی مناسب به محل موردنظر انتقال داده شده و در آن‌جا به‌سرعت آماده نصب و راه‌اندازی می‌شوند. این رآکتورهای کوچک مقیاس، مناسب تولید برق در موقعیت‌هایی هستند که امکان راه‌اندازی رآکتورهای بزرگ در آن‌ها وجود ندارد. به‌دلیل ساختار ماژولار رآکتورهای SMR با اضافه و یا کم کردن قلب‌های مجزای دیگری به قلب مرکزی رآکتور، میزان تولید برق افزایش یا کاهش می‌یابد [۱۷].

با توجه به ویژگی‌های برجسته رآکتورهای زیربحرانی و SMR، بسیاری از پژوهش‌گران در سراسر جهان فعالیت‌های محاسباتی و تجربی گسترده‌ای بر روی این نسل از رآکتورها انجام داده‌اند. مرکز توسعه علوم و فن‌آوری Holos-Gen-LLC واقع در Park Manassas از ویرجینیای ایالات متحده آمریکا است و در زمینه توسعه تولید ژنراتورهای هسته‌ای قابل حمل با طراحی ساده و نوآورانه و بهینه‌سازی شده برای تولید برق اقتصادی، بدون آلاینده و از همه مهم‌تر ایمن، تمرکز دارد. رآکتور بحرانی هولوس نمونه یک رآکتور کوچک ماژولار SMR با توان حرارتی کم‌تر از ۱۰۰ MW است و از سیستم تبدیل گرما به برق توربوجت با بازده بالا استفاده می‌کند [۱۸].

در پژوهش حاضر، محاسباتی برای زیربحرانی‌سازی رآکتور بحرانی هولوس و بالا بردن سطح ایمنی و کارکرد آن انجام شده است؛ در واقع در رآکتورها از میله‌های کنترل برای تنظیم سطح توان و راکتیویته رآکتور در حال کار استفاده می‌شود. رآکتورهای هولوس دارای سیستم بازوهای کنترل راکتیویته مکانیکی (Automatic Module Positioning System (AMPS)) متصل به چهار قسمت مجزای قلب هولوس هستند و احتمال



۱.۲ خواص فیزیکی هدف فوتونوترونی

تعدادی از مواد مناسب برای هدف فوتونوترونی در قلب ADS مانند تنگستن، تانتالیم، جیوه، سرب و سرب- بیسموت که عدد اتمی بالایی دارند، خواص فیزیکی و ترمودینامیکی آن‌ها شامل چگالی، ظرفیت ویژه گرمایی، نقطه ذوب، نقطه جوش و رسانندگی حرارتی در جدول ۱ با هم مقایسه شده است [۲۱].

برخی از ویژگی‌های اهداف فوتونوترونی عبارتند از عدد اتمی و چگالی اتمی بالا، بیش‌ترین بازده تولید نوترون (n/e)، عدم جذب نوترون‌های تولید شده در هدف و عبور آن‌ها از هدف (هدایت نوترونی) و انتقال حرارتی بالا. یک هدف تنگستنی از نظر هدایت نوترونی مناسب نیست؛ در دماهای بالاتر از 600°C تا 700°C ، بسیار تُرد و شکننده است، در دمای اتاق حالت جامد دارد و در دماهای بالا (نقطه ذوب تنگستن 3422°C) ذوب شده و به حالت مایع درخواهد آمد. هدف تنگستنی در برابر یک چشمه پالسی با قدرت تمرکز توان بالا بسیار ناپایدار است [۲۲].

۲.۲ بررسی رفتار نوترونی هدف فوتونوترونی

ذرات باردار سبک شتاب‌دار (الکترون) با عبور از یک محیط مادی به دو روش اتلاف برخوردی و اتلاف تابشی برمشترلانگ انرژی خود را از دست می‌دهند و در نتیجه تابش الکترومغناطیس (برمشترلانگ) تولید خواهد شد. در برهم‌کنش این فوتون‌های پراثرژی با هسته‌های هدف فوتونوترونی و در شرایط خاص ($E_{\gamma} > 6 \text{ MeV}$ ، انرژی آستانه گاما [۲۳])، یک یا چند نوترون تولید می‌شوند.

هدف، طی برخوردی‌های کشسان و غیرکشسان آن‌ها با هسته‌های محیط، در محدوده انرژی تشدیدی قرار خواهد گرفت و به‌شدت در محیط جذب می‌شوند. از طرفی با کم شدن ابعاد هدف فوتونوترونی، تعداد نوترون اولیه قابل توجهی گسیل نخواهد شد [۹]. در بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده روی شتاب‌دهنده‌های الکترونی، جریان باریکه در حد چند میلی‌آمپر است؛ در پژوهش حاضر، باریکه الکترونی 1 mA با توزیع فضایی گوسی و پهنای قله در نیم ارتفاع بیشینه (FWHM) برابر با 1 cm انتخاب شد. شبیه‌سازی با استفاده از کد $2/6 \text{ MCNPX}$ انجام گرفت تا امکان مقایسه نتایج این کار با مطالعات دیگران فراهم شود. میزان تولید نوترون و فوتون درون هدف و نشت این ذرات از هدف فوتونوترونی، مقدار گرمای ذخیره شده درون هدف به تفکیک ذره (نوترون، فوتون)، انتخاب ابعاد بهینه هدف فوتونوترونی و انتخاب انرژی مناسب الکترون‌های فرودی مواردی هستند که با استفاده از کد $2/6 \text{ MCNPX}$ در این پژوهش محاسبه شدند. توزیع گرمایی هموارتر و کم‌تر درون هدف، به‌گونه‌ای که انتقال حرارت آن امکان‌پذیر بوده و گرمای به‌جا مانده درون آن در حد کیلووات باشد تا امکان خنک‌سازی آن با jetcooling فراهم شود و تولید بیش‌ترین شار نوترون توسط هدف فوتونوترونی، شرایطی هستند که در ارزیابی نتایج کد در نظر گرفته شدند. به ازای تعداد تاریخچه ذرات چشمه (nps) کم‌تر از 10^6 میلیون ذره، خطای محاسبات به کم‌تر از 10% رسیدند. برای اعتبار بخشیدن به محاسبات، مطابق با شیوه شبیه‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر، بخشی از پژوهش مشابه انجام شده شبیه‌سازی شد و با نتایج انتشار یافته توسط دیگران مقایسه گردید (بخش ۲.۲).

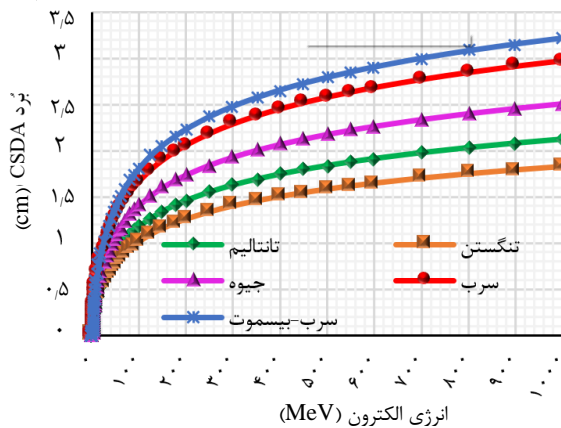
جدول ۱. مشخصات فیزیکی چند ماده هدف فوتونوترونی

تنگستن	تانتالیم	سرب (۴۴/۵) - بیسموت (۵۵/۵)	سرب	جیوه	
*۱۹,۳	*۱۶,۶۹	*۱۰,۴۷۴	*۱۱,۳۴	۱۳,۶۹	چگالی (g/cm^3)
۱۱۷,۶	۱۵	**۱۰,۱۵۰	**۱۰,۶۶	**۱۲,۵۱	
۳۴۲۲	۳۰۱۷	۱۲۵	۳۲۷,۴۶	-۳۸,۹	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
۵۶۶۰	۵۴۲۵	۱۶۳۸	۱۷۴۹	۳۵۶,۷	نقطه جوش ($^{\circ}\text{C}$)
۱۷۴	۵۷,۵	*۱۰	*۳۵	*۸,۳۴	رسانندگی حرارتی ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
-	-	**۱۴,۲	**۱۷,۱	**۱۳	
-	-	۳۹۳	۴۳۸	۳۵۹	تنش سطحی در 450°C ($0,1001 \text{ N/m}$)
۱۷۲	۹۰۰	-	-	-	استحکام کششی (MPa)

* جامد در 20°C . ** مایع در 450°C .

۱ در حالت مایع و نقطه ذوب





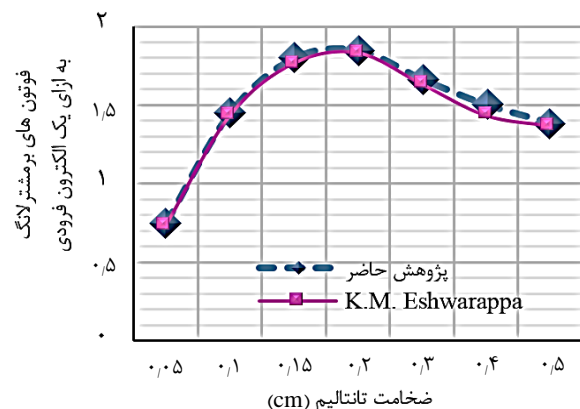
شکل ۲. برد CSDA الکترون‌ها در مواد و انرژی‌های مختلف.

در رآکتورهای زیربحرانی واداشته با شتاب‌دهنده الکترونی، اهداف فوتونوترونی تحت بمباران جریان بالایی از باریکه الکترون‌ها و ذرات ثانویه تولیدی قرار می‌گیرند و آهنگ گرمای حجمی خیلی بالایی در هدف فوتونوترونی ذخیره می‌شود. بنابراین بررسی میزان انباشت گرما در طراحی هدف حایز اهمیت است.

۱.۲.۲ گرمای ذخیره شده در هدف فوتونوترونی برای استوانه هدف به شعاع ۸ cm و ارتفاع ۱۰ cm، مقدار انباشت گرما در هدف به ازای انرژی‌های الکترونی متفاوت و برای نوترون و فوتون با هم مقایسه شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در بررسی مقدار انباشت گرما درون هدف فوتونوترونی، سهم فوتون‌ها و الکترون‌ها نسبت به نوترون‌ها بیش‌تر است. سطح مقطع جذب نوترون در تالیوم نسبت به ۴ عنصر دیگر بیش‌تر است و در نتیجه میزان گرمای ذخیره شده حاصل از جذب نوترون در آن زیادتر خواهد بود. انباشت گرما در سرب ناشی از نوترون‌ها به‌طور متوسط ۸۵٪ نسبت به تانتالیم و ۱۶٪ نسبت به تنگستن کم‌تر و ۳۴٪ نسبت به جیوه و ۲۵٪ نسبت به سرب- بیسموت بیش‌تر است. طبق محاسبات، میزان گرمای ذخیره شده در سرب ناشی از جذب نوترون‌ها، بین ۸۲٪ (به ازای انرژی الکترونی ۵۰ MeV) نسبت به تانتالیم کم‌تر است. میزان انباشت گرمای ناشی از فوتون‌ها و الکترون‌ها در هدف با افزایش انرژی الکترون فرودی افزایش یافته و این تغییرات در مواد انتخابی مختلف تقریباً یکسان است (شکل ۳). در محاسبه گرمای ذخیره شده با استفاده از کد MCNPX۲۶ از تالی F۶ برای نوترون و فوتون استفاده شد. از آن‌جا که در خروجی کد مقدار تالی F۶ برحسب MeV به ازای یک ذره چشمه داده می‌شود، برای تبدیل یکای تالی به watt از کارت FM استفاده شد و برای چشمه

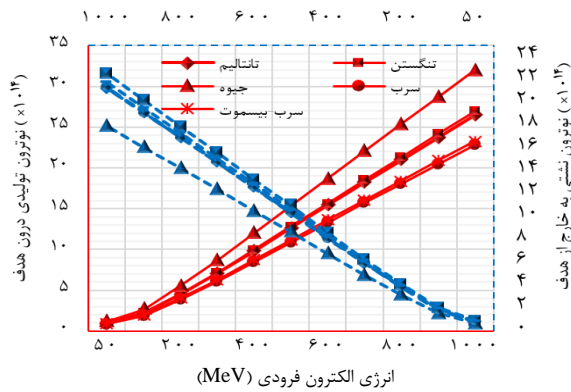
شتاب‌دهنده‌های خطی بیمارستانی قابل حمل، باریکه‌های الکترونی کم‌انرژی (کم‌تر از ۵۰ MeV) تولید می‌کنند؛ به‌عنوان نمونه، ابعاد شتاب‌دهنده میکروترون دایروی کم‌تر از ۳ m است و امکان انتقال آن وجود دارد ولی شتاب‌دهنده‌های خطی الکترونی انرژی بالا، بزرگ مقیاس و غیر قابل حمل هستند [۲۴]. در گزارشی از آقای Eshwarappa در دانشگاه Mangalore، چشمه نوترون واداشته با شتاب‌دهنده الکترونی میکروترون با انرژی‌های الکترونی ۹ MeV تا ۱۲ MeV و هدف فوتونوترونی تانتالیم- برلیوم بررسی شده است. قدرت این چشمه نوترون برابر با 10^9 n/s تا 10^{10} n/s است. برای تولید فوتون‌های برمشترلانگ و نوترون به‌ترتیب از ماده هدف تانتالیم و برلیوم استفاده شده است [۲۴]. در اعتبارسنجی صورت‌گرفته، فوتون‌های برمشترلانگ تولیدی به ازای ضخامت‌های متفاوتی از هدف تانتالیم با شعاع ثابت ۸ cm و تحت تابش الکترون‌های ۱۰ MeV محاسبه گردید و با نتایج مرجع [۲۴] مقایسه شد. مقایسه بین این نتایج در شکل ۱ نشان داده شده است.

ابعاد هدف فوتونوترونی باید به گونه‌ای باشند که تمام باریکه الکترونی تابیده شده به آن را متوقف کند؛ بنابراین برای تعیین ابعاد اولیه‌ی هدف فوتونوترونی که قرار است در قلب هولوس جای بگیرد، بردهای CSDA در پنج ماده جاذب با عدد اتمی بزرگ که ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها در قسمت قبل بررسی شد، در انرژی‌های الکترونی متفاوت با هم مقایسه شدند (شکل ۲) [۲۵، ۲۶]. با توجه به این بردهای الکترونی و به‌منظور بهینه‌سازی ابعاد هدف فوتونوترونی، در شبیه‌سازی اولیه با استفاده از کد MCNPX۲۶، استوانه‌ای به شعاع ۸ cm و ارتفاع ۱۰ cm (۴ تا ۵ برابر برد ۲ cm مربوط به الکترون در فلزات سنگین انتخاب شده) و بدون در نظر گرفتن قلب رآکتور زیربحرانی، شبیه‌سازی شد.

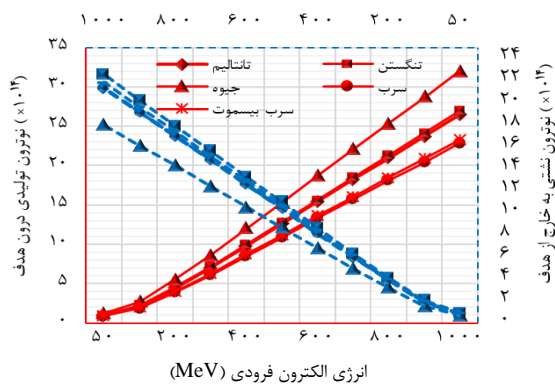


شکل ۱. فوتون‌های برمشترلانگ تولیدی به ازای الکترون‌های ۱۰ MeV در پژوهش حاضر و نتایج مرجع [۲۴].





شکل ۴. فوتون تولیدی درون هدف و نشتی به خارج از هدف فوتونوترونی به ازای باریکه الکترونی ۱ mA با انرژی‌های متفاوت.



شکل ۵. نوترون‌های تولیدی درون هدف و نشتی به خارج از هدف فوتونوترونی به ازای باریکه الکترونی ۱ mA با انرژی‌های متفاوت.

۳.۲ بهینه‌سازی هدف فوتونوترونی

بر اساس نمودارهای سطح مقطع‌های شکافت اورانیوم-۲۳۵ و ۲۳۸، احتمال وقوع نوترون-شکافت نسبت به فوتون-شکافت غالب است و بنابراین هرچه شار نوترون‌های اولیه حاصل از هدف فوتونوترونی (به‌ویژه در انرژی‌های بالاتر از ۱ MeV و کم‌تر از ۱۰ eV که احتمال شکافت بالایی دارند) بیشتر باشد، آهنگ شکافت در قلب زیربحرانی افزایش می‌یابد ولی به ازای الکترون‌های فرودی پراثری، شار نوترون‌های خروجی از هدف افزایش یافته و مطابق شکل ۲، گرمای ذخیره شده کل درون هدف فوتونوترونی بیشتر است (تنها گرمای ذخیره شده فوتونی درون هدف به ازای انرژی الکترونی ۲۰۰ MeV تقریباً برابر ۱۸۰ kW و نسبت به انرژی الکترونی ۲۰ MeV، ۸۰٪ بیشتر است). در انرژی‌های الکترونی پایین (کم‌تر از ۱۰۰ MeV)، میزان تولید ذرات ثانویه‌ای مانند نوترون، فوتون و الکترون و انباشت گرمایی درون هدف فوتونوترونی کم‌تر هستند.

هدف بهینه باید نه تنها آهنگ بالای نشت فوتون و نوترون و ضریب انتقال حرارت بالا داشته باشد، بلکه گرمای به‌جا مانده در

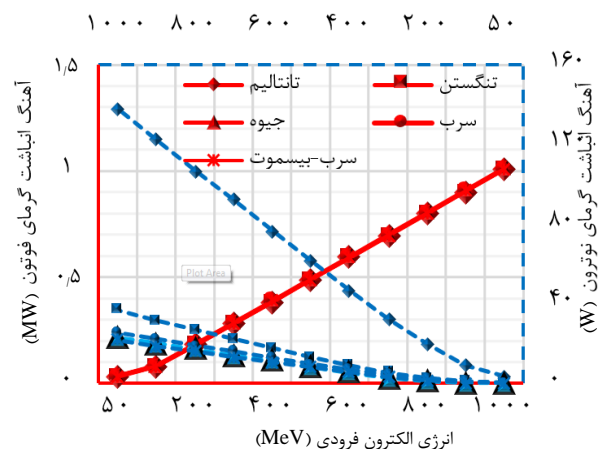
الکترون با جریان ۱ mA و قدرت $(6/25 \times 10^{15} \text{ n/s})$ ، از دستور FM۶ ۱۰۰۰ در فایل ورودی کد استفاده شد.

۳.۲.۲ میزان تولید و فرار فوتون‌ها از اهداف فوتونوترونی

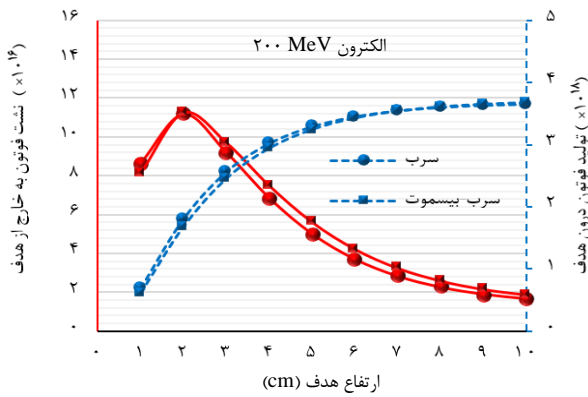
میزان تولید فوتون بیش‌تر درون هدف و خروج کم‌ترشان از آن، احتمال وقوع برهم‌کنش‌های فوتونوترونی را افزایش خواهد داد که وضعیت مطلوبی برای مسئله به شمار می‌آید (شکل ۴). سرب و سرب-بیس‌موت، تولید فوتون بیش‌تری نسبت به سایر مواد دارند و البته تعداد فوتون‌های خروجی از هدف هم در آن‌ها نسبت به سایر مواد بیش‌تر است. برای بخشی از فوتون‌های نشتی از هدف که وارد قلب رآکتور می‌شوند، احتمال واکنش القایی فوتون-شکافت وجود دارد (بر اساس نمودارهای سطح مقطع، فوتون‌های با انرژی بین ۱۰ MeV تا ۲۰ MeV بیش‌ترین احتمال شکافت را دارند).

۳.۲.۲ میزان تولید و فرار نوترون‌ها از اهداف فوتونوترونی

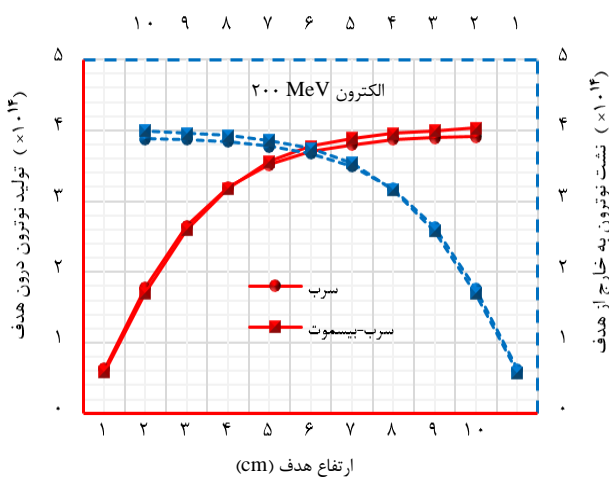
میزان تولید نوترون در هدف فوتونوترونی به انرژی الکترون‌های فرودی و جنس ماده هدف فوتونوترونی وابسته است. در شکل ۵، تعداد نوترون‌های تولیدی درون هدف و خارج شده از هدف استوانه‌ای با شعاع ۸ cm و ارتفاع ۱۰ cm برای مواد مختلف نشان داده شده است. تولید زیاد نوترون درون هدف و نشت بیش‌تر آن‌ها از آن به سمت قلب رآکتور زیربحرانی، شرایط مطلوبی است. طبق نتایج به‌دست آمده از میان مواد انتخابی، سرب و سرب-بیس‌موت نسبت به سایر مواد، تولید نوترون کم‌تری دارند ولی سرب برخلاف عناصر دیگر، جذب نوترون پایینی داشته و تقریباً بیش‌تر نوترون‌های تولیدی درون هدف سربی از آن خارج می‌شوند.



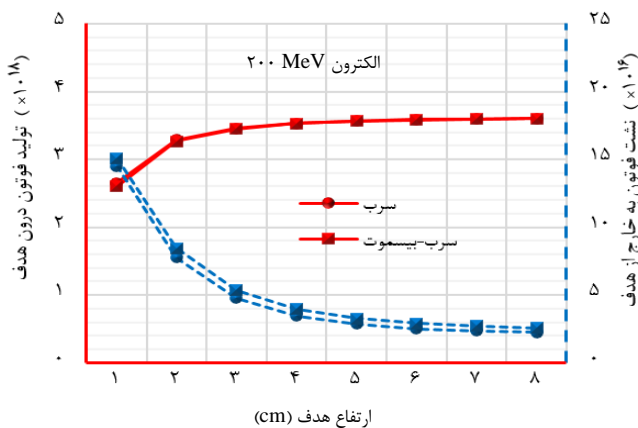
شکل ۳. آهنگ انباشت گرمای فوتون و نوترون به ازای باریکه الکترونی ۱ mA با انرژی‌های متفاوت.



شکل ۶. تولید و نشت فوتون به ازای ارتفاع‌های مختلف هدف فوتونوترونی و باریکه الکترونی ۱ mA.



شکل ۷. تولید و نشت نوترون به ازای ارتفاع‌های مختلف هدف فوتونوترونی و باریکه الکترونی ۱ mA.



شکل ۸. تولید و نشت فوتون به ازای شعاع‌های مختلف هدف فوتونوترونی و باریکه الکترونی ۱ mA.

آن نیز نباید بیش از کیلووات باشد؛ بنابراین هر چند انرژی‌های بیش‌تر الکترون می‌توانند آهنگ نشت فوتون و نوترون را از هدف انتخاب شده بالا ببرند، اما عدم امکان خنک‌سازی و انتقال حرارت آن مانع انتخاب انرژی بیش‌تر شتاب‌دهنده می‌گردد. هم‌چنین شتاب‌دهنده‌های انرژی‌های بالاتر عموماً جریان‌های باریکه کم‌تری خواهند داشت زیرا کانونی کردن باریکه ذره باردار شتاب‌دار در انرژی‌های بالاتر، سخت‌تر است و ساخت چنین شتاب‌دهنده‌هایی پرهزینه‌تر و طول آن‌ها بیش‌تر خواهد بود. از طرفی، بیش‌تر شتاب‌دهنده‌های قابل‌حمل الکترونی، الکترون‌های کم انرژی تولید می‌کنند که در برخی مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۱].

بنابراین برای به‌دست آوردن ابعاد بهینه ماده هدف، به ازای دو ماده سرب و سرب-بیسموت و برای انرژی‌های الکترونی ۲۰۰ MeV و ۲۰ MeV، تعداد نوترون و فوتون‌های تولید شده درون هدف و نشت کرده به خارج از هدف، با استفاده از کد MCNPX ۲/۶ محاسبه و با یک‌دیگر مقایسه شدند (شکل‌های ۶ تا ۹).

یکی از گزینه‌های مهم در طراحی هدف تلاشی رآکتورهای ADS، تولید نوترون خروجی زیاد از هدف است؛ بنابراین، باید در بررسی نمودارها و نتایج محاسبات MCNPX و به‌دست آوردن ابعاد بهینه برای هدف فوتونوترونی نکات زیر در نظر گرفته شود: (۱) تولید فوتون زیاد درون هدف و به حداقل رسیدن نشت آن‌ها؛ چرا که در برهم‌کنش الکترون با اتم‌های هدف، این فوتون‌های برمشترلانگ تولیدی هستند که وظیفه اصلی تولید نوترون درون هدف فوتونوترونی را بر عهده دارند. (۲) تولید نوترون زیاد درون هدف و نشت حداکثری نوترون‌ها از هدف. در نمودارهای تغییر ارتفاع استوانه هدف فوتونوترونی، شعاع استوانه‌ها ثابت و برابر ۸ cm در نظر گرفته شد. نحوه تغییرات تولید فوتون درون هدف نشان می‌دهد بیش‌ترین تولید فوتون در ارتفاع بزرگ‌تر از ۸ cm اتفاق می‌افتد و در همین بازه نشت فوتون‌ها به کم‌ترین مقدار رسیده و در نتیجه میزان جذب فوتون در محیط و انباشت گرما در آن افزایش خواهد یافت (شکل ۶).



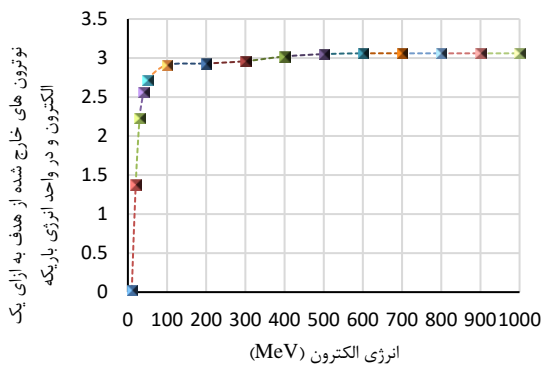
۴.۲ انرژی بهینه الکترون

در شکل ۱۰ نمودار نوترون‌های خارج شده از هدف فوتونوترونی بهینه شده سربی به ازای یک ذره چشمه و در واحد انرژی باریکه الکترونی (۱ MeV) نسبت به انرژی‌های الکترونی فرودی متفاوت نشان داده شده است.

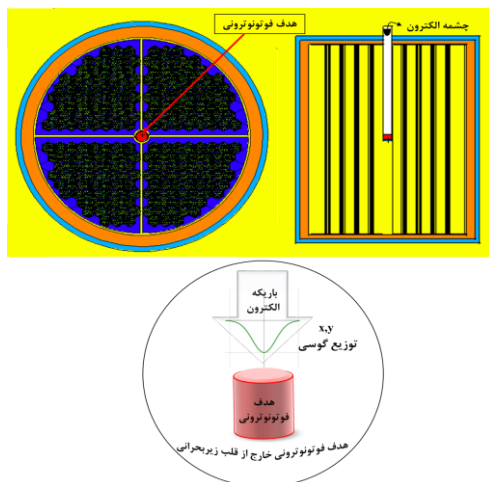
ارزش نوترون به ازای باریکه الکترونی فرودی روی هدف بهینه شده برابر با تعداد نوترون‌های خارج شده از هدف به ازای یک ذره چشمه و در واحد انرژی باریکه، است. در شرایط بهینه، بیشترین نوترون نشستی از هدف بهینه شده با شعاع ۵ cm و ارتفاع ۶ cm در محدوده انرژی‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰ MeV اتفاق می‌افتد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که باریکه‌های الکترونی با انرژی بزرگ‌تر از ۱۰۰ MeV، نه تنها ارزش و تأثیرشان در تولید نوترون روی این هدف فوتونوترونی بهینه یکسان است بلکه هزینه تولید بیش‌تری نیز دارند.

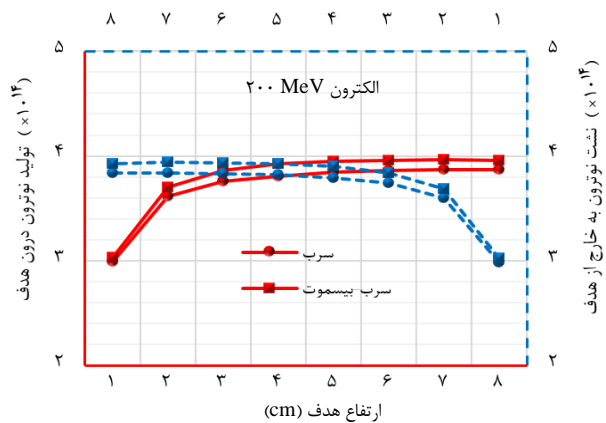
در شکل ۱۱ تصویر شبیه‌سازی قلب رآکتور زیربحرانی شده هولوس به همراه هدف فوتونوترونی با کد MCNPX۲/۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. انرژی بهینه باریکه الکترون‌های فرودی.



شکل ۱۱. هدف فوتونوترونی شبیه‌سازی شده با کد MCNPX۲/۶ درون قلب زیربحرانی هولوس (تصویر بالا) و هدف خارج از قلب رآکتور و داخل کره خلأ (تصویر پایین).



شکل ۹. تولید و نشست نوترون به ازای شعاع‌های مختلف هدف فوتونوترونی و باریکه الکترونی ۱ mA.

نحوه تغییرات تولید نوترون در هدف نشان می‌دهد بیشترین تولید نوترون در ارتفاع بزرگ‌تر از ۸ cm اتفاق می‌افتد و در همین بازه، نشست نوترون‌ها بیشینه می‌شوند. با توجه به شکل ۷، بخش عمده‌ای از نوترون‌های تولیدی درون هدف سرب و سرب-بیسموت از آن خارج می‌شوند که ناشی از ویژگی فیزیکی سرب است که در میان فلزات از بیشترین شفافیت نسبت به نوترون‌ها برخوردار است. تکرار محاسبه انجام شده در این مرحله از پژوهش روی هدف تانتالیم نشان داد که اختلاف زیادی بین میزان تولید و نشست نوترون از هدف تانتالیم وجود دارد.

به‌طور مشابه، محاسبات کد MCNPX برای انرژی الکترونی ۲۰ MeV تکرار شدند.

در نمودارهای تغییر شعاع استوانه هدف فوتونوترونی، ارتفاع استوانه‌ها ثابت است و ۸ cm به ازای انرژی الکترونی ۲۰۰ MeV و یا ارتفاع ثابت ۶ cm به ازای انرژی الکترونی ۲۰ MeV، در نظر گرفته شدند (شکل‌های ۸ تا ۹). براساس شکل ۸، با افزایش شعاع هدف فوتونوترونی، فوتون‌های تولیدی درون هدف زیاد می‌شوند و تولید فوتون در شعاع بزرگ‌تر از ۵ cm بیشینه و ثابت می‌شود. نشست فوتون تا شعاع ۵ cm کاهش می‌یابد و بعد از آن، نشست فوتون‌ها به کمترین مقدار رسیده و ثابت می‌شود.

نحوه تغییرات تولید نوترون درون هدف نشان می‌دهد بیشترین تولید نوترون در شعاع‌های بزرگ‌تر از ۵ cm اتفاق می‌افتد و در همین بازه، نشست نوترون‌ها به بیشینه می‌رسد (شکل ۹). محاسبات مشابه شکل‌های ۷ و ۸ به ازای انرژی الکترونی ۲۰ MeV تکرار شدند.

بنابراین، شعاع و ارتفاع بهینه هدف فوتونوترونی استوانه‌ای شکل به ترتیب برابر با ۵ cm و ۸ cm (در انرژی الکترونی ۲۰۰ MeV) و برابر ۵ cm و ۶ cm (در انرژی الکترونی ۲۰ MeV) به‌دست آمد.

4. IAEA, *Nuclear Fuel Cycle*. Material Section. Thorium fuel cycle-potential benefits and challenges-IAEA-Tecdoc-1450. **Technical Report, IAEA, International Atomic Energy Agency**, (2005).
5. M. Tatari, A.H. Ranjbar, *Design of a photoneutron source based on 10 MeV electrons of radiotherapy linac*, **Annals of Nuclear Energy**, **63**, 69 (2014).
6. D. Ridikas, H. Safa, M-L. Giacri, *Conceptual study of neutron irradiator-driven by electron accelerator*, **CEA Saclay, DSM/DAPNIA/SPhN, F-91191 Gif-sur-Yvette, France**.
7. M. Hassanzadeh, S.A.H. Fegghi, *Analysis of burn up effects on kinetic parameters in an Accelerator Driven Subcritical TRIGA reactor*, **Annals of Nuclear Energy**, **62**, 280 (2013).
8. M. Amirkhani, M. Hassanzadeh, *Neutronic Investigation of Fissionable Spallation Targets in Accelerator Driven Systems*, **Journal of Nuclear Science and Technology (Jonsat)**, **38**, 81, 13 (2017) (In persian).
9. Y.L. Zhang, et al. *Study on the Parameters of the ADS Spallation Target*, **J. Phys. Conf. Ser.** **420**, 012064 (2013).
10. Mario Carta et al. *Electron versus proton accelerator driven sub-critical system performance using TRIGA reactors at power*, **Physor-2006**, (2006).
11. David Sean O'Kelly, *PHD thesis*, **The University of Texas at Austin**, (2008).
12. Didi, Abdessamad et al. *Neutron flux distribution in (Pb, Ta and W) target using accelerator of 18 MeV electron beam*, **Eurasian Journal of Physics and Functional Materials**, **2**, 2, 129 (2018).
13. Kazuaki Kosako, et al. *Angular Distribution of Photoneutrons from Copper and Tungsten Targets Bombarded by 18, 28, and 38 MeV Electrons*, **J. Nucl. Sci. Technol.** **48**, 227 (2011).
14. W.L. Huang, et al. *Measurements of photoneutrons produced by a 15 MeV electron linac for radiography applications*, **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B**, **251**, 361 (2006).
15. F. Torabi, S.F. Masoudi, F. Rahmani, *Photoneutron production by a 25 MeV electron linac for BNCT application*, **Ann. Nucl. Energy**, **54**, 192 (2013).
16. W.L. Huang, Q.F. Li, Y.Z. Lin, *Calculation of photo neutrons produced in the targets of electron linear accelerators for radiography and radiotherapy applications*, **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B**, **229**, 339 (2005).
17. Daniel T Ingersoll, *Small Modular Reactors: Nuclear Power Fad or Future?*, 1st ed. (Woodhead Publishing, USA, 2015).
18. Holos Generators, <http://www.holosgen.com/>.
19. Denise, B. Pelowitz, *MCNPX User's Manual Version 2.6.0*, April 2008. **LACP-07-1473, LANL**, (2008).
20. Graiciany P. Barros, et al. *Neutron production evaluation from a ADS target utilizing the MCNPX 2.6.0 code*, **Braz. J. Phys.** **40**, 414 (2010).
21. P.L. Kirillov, *Thermophysical Properties of Materials For Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data*, 3rd ed. (Obninsk), (2008).

۳. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، محاسبات اولیه طراحی هدف فوتونوترونی بهینه برای زیربحرانی‌سازی قلب بحرانی رآکتور هولوس انجام شد. بررسی خواص فیزیکی و ترمودینامیکی پنج ماده انتخابی با عدد اتمی بالا نشان می‌دهند که فلز سرب با داشتن نقطه ذوب پایین ($327/46^{\circ}\text{C}$) و نقش مؤثر سرب مذاب در خارج کردن گرمای تولیدی در هدف سربی به روش همرفت طبیعی (برخلاف هدف تنگستنی)، کم‌تر بودن میزان انباشت گرمایی آن در بین چهار عنصر دیگر، کم‌ترین میزان جذب نوترون در آن و رفتار نوترونی مطلوب، انتخاب مناسبی خواهد بود.

براساس محاسبات انجام شده با کد MCNPX ۲٫۶ در پژوهش حاضر، برای الکترون‌های با انرژی ۲۰۰ MeV، ارتفاع ۸ cm و شعاع ۵ cm و برای الکترون‌های ۲۰ MeV، ارتفاع ۶ cm و شعاع ۵ cm به‌عنوان ابعاد بهینه هدف برآورد شدند. انرژی‌های الکترونی بزرگ‌تر از ۱۰۰ MeV، ارزش نوترونی یکسانی دارند. نوترون‌های خارج شده از هدف فوتونوترونی به ازای واحد انرژی الکترون، در انرژی‌های الکترونی بزرگ‌تر از ۱۰۰ MeV تغییرات چندانی ندارند و از نظر اقتصادی بهتر است که از انرژی‌های کم‌تر از ۱۰۰ MeV در پرتوهدی هدف فوتونوترونی استفاده شود.

لازم است بررسی جنبه‌هایی نظیر محاسبات ترموهیدرولیکی و نحوه توزیع گرما و دما درون هدف فوتونوترونی با استفاده از مش‌تالی و اثر شکل‌های هندسی در نحوه توزیع گرمایی هدف، طراحی شکل هندسی هدف به لحاظ انتقال حرارت، تخمین میزان رادیواکتیوته هدف، اثرات ناشی از مدت زمان پرتوهدی روی هدف، تغییر تعداد هدف‌ها، نحوه توزیع زاویه‌ای ذرات خارج شده از هدف با شکل‌های هندسی متفاوت، حفاظ جانبی، طیف نوترون و فوتون‌های خروجی از هدف فوتونوترونی، بررسی نوترونیکی شکل‌های هندسی متفاوت هدف فوتونوترونی و ... در پژوهش‌های آتی انجام گیرد.

مراجع

1. H. Nifenecker, et al. *Basics of accelerator driven subcritical reactors*, **Nucl Instrum Meth**, **A.463**, 428 (2001).
2. R. Sheffield, et al. *Accelerator and spallation target technologies for ADS applications*. Nuclear Energy Agency, **Nuclear Science Status Report** (2005).
3. S.B. Degweker, et al. *The physics of accelerator driven sub-critical reactors*, **Pramana J.Phys.** **68**, 161 (2007).



22. Y. Kadi, J.P. Revol, *Design of an Accelerator-Driven System for the Destruction of Nuclear Waste*, 1st ed. (European Organization for Nuclear Research, CERN, Geneva, Switzerland, 2001).
23. A.O. Hanson, et al. *Thresholds for Photo-Neutron Reactions in Mn, Zn, Zr, Mo, Cd, Pr, Nd, Au, Hg, Tl and Pb*, *American Physical Society (APS)*. **76**, 578 (1949).
24. K.M. Eshwarappa, et al. *Estimation of photoneutron yield from beryllium target irradiated by variable energy microtron-based bremsstrahlung radiation*, *Nucl Instrum Meth A*.540, 412 (2005).
25. Anshu Saxena, S.K. Rathi, A.S. Verma, *Continuous Slowing Down Approximation (CSDA) ranges of electrons for biomedical materials*, *Elixir Bio. Phys.* **37**, 3860 (2011).
26. M.J. Berger, et. al., *Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions*, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>, (ESTAR database), (1998).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

ساره ارحمی، محمد مهدی فیروزآبادی، زهره غلامزاده (۱۴۰۰)، طراحی و بهینه‌سازی هدف فوتونوترون به منظور استفاده در رآکتورهای نسل جدید واداشته توسط شتاب‌دهنده، ۹۶، ۴۲-۵۱

DOI: [10.24200/nst.2021.1199](https://doi.org/10.24200/nst.2021.1199)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1199.html

