امکان‌سنجی تولید رادیوایزوتوپ مس۶۴ مبتنی بر شتاب‌دهنده الکترون ۱۰ مگا الکترون ولت با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو

عابدی، حجّت - رحمانی، فائزه

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ، دانشکده فیزیک ، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

یکی از رادیوایزوتوپ های پرکاربرد در زمینه تشخیص و درمان در پزشکی مس ٦٤ است که با روش‌های مختلفی تولید می‌شود. شتاب‌دهنده‌های ذرات باتوجه به مزایایی از قبیل ایمنی و ارزان بودن (نسبت به راکتورها)، از جایگاه ویژه‌ای در تولید این رادیوایزوتوپ برخوردار هستند. در این پژوهش استفاده از شتاب‌دهنده الکترون با توان بالا (۱۰۰ کیلووات، انرژی ۱۰ مگاالکترون ولت) برای تولید رادیوایزوتوپ مس ٦٤ پیشنهاد شده است. در این فرایند از یک هدف مبدل الکترون-فوتون (مبنی بر اندرکنش تابش ترمزی) و به دنبال آن هدف فتونوترونی (آب سنگین) برای تولید نوترون استفاده می شود. با توجه به استفاده از آب سنگین به عنوان محیط مولد فتونوترون، همزمان فرایند کندسازی نوترون نیز انجام می شود. سپس با استفاده از اندرکنش جذب گامازا در مس، رادیوایزوتوپ مس ٦٤ تولید خواهد شد. طراحی و بهینه‌سازی بخش‌های مختلف (نوع ماده و ابعاد) با شبیه سازی مونت‌کارلو (MCNPX2.6) طوری انجام شده است که منجر به تولید بیشترین اکتیویته مس٦٤ شود.

کلمات کلیدی: شتاب‌دهنده ۱۰ مگاالکترون‌ولت - رادیوایزوتوپ مس ٦٤ - کد MCNPX2.6 – آب سنگین – فتونوترون

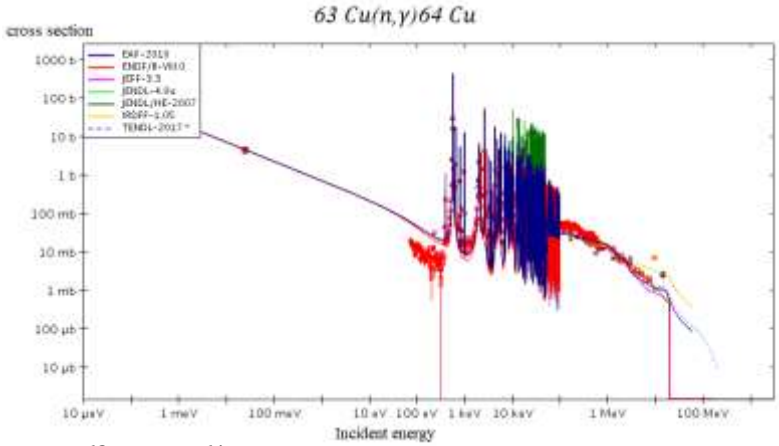
مقدمه :

امروزه بخش قابل توجهی از فناوری هسته‌ای مربوط به تولید و استفاده از رادیوایزوتوپ‌های پزشکی و صنعتی می‌با شد. رادیوایزوتوپ‌های مس ٦٤ و مس ٦٧ کاربردهای زیادی در پز شکی ت شخی صی و درمانی دارند. مس ٦٤ با واپاشی β^+ حدود ٪۱۹ و واپاشی β^- حدود ٪۳۸ وگیراندازی الکترون حدود ٪٤۳ ، یک رادیونوکلئید زیست پز شکی مهم ا ست که برای برچسب زدن طیف گسترده‌ای از داروهای رادیو اکتیو برای تصویربرداری PET و همچنین سیستم رادیوایمونوتراپی تومورها مناسب است. همچنین امکان تصویربرداری PET با قدرت تفکیک مکانی بالا را ممکن می‌سازد. نیمه عمر متوسط آن ۱۲/۷ ساعت است که امکان بررسی مسیرهای زیست شیمیایی آهسته مانند تعامل پروتئین و پپتید با اهداف سلولی و توزیع به مراکز تصویربرداری را فراهم می‌کند [۲-۱].

بیشترین تمرکز تولید مس ٦٤ مبتنی بر سیکلوترون با اندرکنش‌هایی نظیر $^{64}Ni(p,n)^{64}Cu$ و $^{64}Ni(d,2n)^{64}Cu$ و $^{64}Zn(p,\alpha+n)^{64}Cu$ است. البته مس ٦٤ را می‌توان طی دو اندرکنش

$^{64}Zn(n,p)^{64}Cu$ و $^{63}Cu(n,\gamma)^{64}Cu$ در راکتور تولید کرد. تولید با راکتور، یا از طریق شکافت عناصر شکافت-پذیر نظیر اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۳ و پلوتونیم ۲۳۹ (احتمال بسیار کم) و نیز از طریق فعال سازی نوترونی مس ۶۳ تولید می‌شود. مس ٦٤ از طریق فعال سازی نوترونی دست یافتنی‌تر است[۲-۱].

سطح مقطع جذب نوترون برای برای مس ٦٣ در شکل ۱ نشان داده شده است. اگرچه تولید مس ٦٤ توسط راکتور به دلیل شار نوترونی بالاتر، بهره‌ی بالاتری دارد، اما برای کاربرد آن در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی، تولید با شتاب‌دهنده دارای ارجحیت است.



شکل ۱ : نمودار سطح مقطع بر حسب انرژی برای اندرکنش $^{63}Cu(n,\gamma)^{64}Cu$ [۳]

شتاب‌دهنده‌های ذرات باتوجه به مزایایی از قبیل ایمنی و ارزان بودن (نسبت به راکتورها)، از جایگاه ویژه‌ای در تولید این رادیوایزوتوپ‌ها برخوردار هستند و می‌توانند از نظر بازدهی تولید با راکتورها نیز قابل رقابت باشند. با توجه به پروژه های متمرکز در کشور بر ساخت و تولید شتاب دهنده الکترون، این نوع شتاب دهنده الکترون برای این کار انتخاب شده است. در حال حاضر تنها شتابدهنده‌ی ۱۰ مگا الکترون‌ولتی الکترون (توان ۱۰۰ کیلووات) در داخل کشور که می‌تواند برای این منظور استفاده شود شتاب‌دهنده رودترون یزد می‌باشد [۴].

روش کار :

همانطور که اشاره شد در این پروژه امکان سنجی تولید مس ٦٤ طی اندرکنش جذب گامازا با نوترون حرارتی مبتنی بر شتاب‌دهنده ۱۰ مگاالکترون‌ولتی مد نظر ا ست، الکترون ۱۰ مگاالکترون‌ولتی پس از برخورد با هدف الکترون-فوتونی و طی اندرکنش تابش ترمزی به طیف فوتونی تبدیل می‌شود. طیف فوتون تولیدی تا انرژی ۱۰ مگاالکترون ولت گسترده شده است. ابعاد و جنس هدف الکترون-فوتون بر اساس بیشینه تولید فوتون انتخاب می‌شود. سپس با انتخاب ماده‌ای دارای سطح مقطع اندرکنش فتونوترون با فوتون‌های تولید شده و بهینه سازی ابعاد، تولید بیشینه شار نوترونی برر سی خواهد شد. از آنجا که بیشترین سطح مقطع اندرکنش تولید در اندرکنش $^{63}Cu(n,\gamma)^{64}Cu$ با نوترون حرارتی است، طیف نوترون تولید شده باید

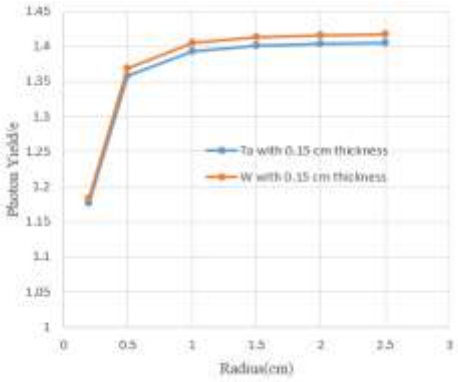
شکل‌دهی شود تا بیشترین مقدار نوترون حرارتی تولید شود. بنابراین برای دستیابی به بیشترین بهره تولید مس ٦٤، هدف الکترون–فوتونی در یک مخزن آب سنگین قرار می‌گیرد. دوتریوم در آب سنگین دارای آستانه سطح مقطع پایین اندرکنش فتونوترون (حدود ۲/۵ مگاالکترون‌ولت) است. همچنین با توجه به اینکه آب سنگین کندکننده نوترون نیز هست، همزمان شار نوترون حرارتی مناسبی نیز تولید خواهد شد. پس برای دستیابی به بیشترین شار نوترون حرارتی، توزیع شار نوترونی داخل مخزن آب سنگین بررسی شده و مکان قرارگیری هدف‌های مس ٦٣ برای انجام فعال‌سازی نوترونی پیشنهاد شده است. با توجه به جریان و انرژی الکترون شتاب‌دهنده و فرایند شبیه‌سازی، اکتیویته تولید شده برای مدت زمان ۲ ساعت محاسبه شد.

نتایج :

برای طراحی هدف الکترون– فوتون، عناصری که برای این منظور مناسب هستند جدول (۱)، مورد ارزیابی قرار داده شدند.

جدول ۱: مقایسه مواد مختلف جهت دستیابی به بیشترین بهره تولید فوتون از تابش باریکه الکترون[٥]

جنس هدف	نماد اتمی	ایزوتوپ‌های پایدار (عدد جرمی)	چگالی (g/cm^3)	نقطه ذوب (K)	ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت گرمایی (W/m.K)	ضریب انبساط حرارتی در دمای اتاق ($\mu m/m.K$)
تانتالیم	$_{73}Ta$	180,181	16.7	3290	57.5	6.3
تنگستن	$_{74}W$	182,183,184,186	19.2	3695	173.0	4.5
رنیوم	$_{75}Re$	185	21.0	3459	48.0	6.2
سرب	$_{82}Pb$	204,206,207,208	11.3	600	35.3	28.9
اورانیوم	$_{92}U$	238^{1}	19.1	1405	27.5	13.9



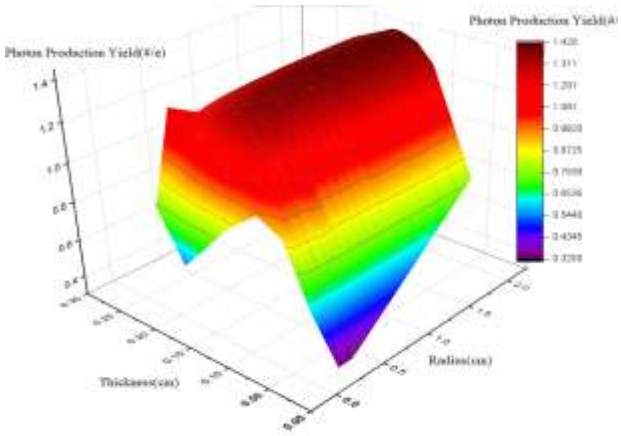
شکل ۲: بهره فوتون در ضخامت‌های بهینه برای هدف‌هایی با جنس تنگستن و تانتالیم

برای انتخاب بهترین ماده جهت استفاده در سیستم مورد نظر، مقایسه‌ای از نظر بهره تولید فوتون در ضخامت‌های مختلف در شرایط باریکه‌ی الکترونی یکسان با انرژی ۱۰ مگا الکترون‌ولت انجام شد. تنگستن و تانتالیم (شکل ۲) رفتار مشابه دارند، اما ازنظر الزامات فنی نظیر چگالی بالاتر، نقطه ذوب بیشتر، ضریب هدایت حرارتی بالاتر و ضریب انبساط حرارتی کمتر، تنگستن دارای برتری است.

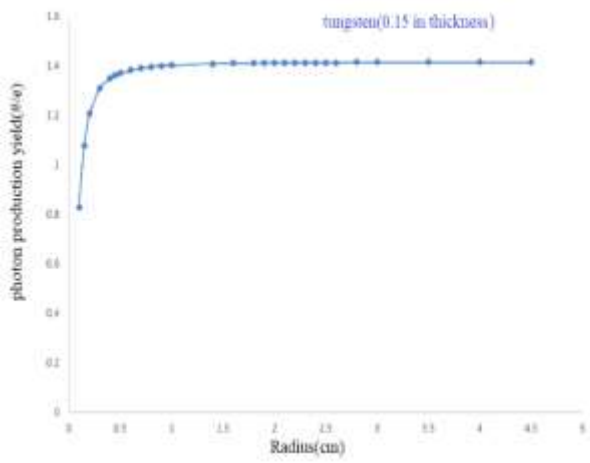
با انتخاب هدف مبدل الکترون به فوتون از جنس تنگستن، ضخامت‌ها و شعاع‌های مختلف مبدل در مقابل باریکه الکترونی شبیه سازی شد و بهره تولید فوتون‌ها (جریان فوتونی گذرنده از صفحه نهایی هدف مبدل الکترون به فوتون، که روبروی هدف فتونوترونی است) برای انرژی ۱۰ مگاالکترون ولتی الکترون محاسبه شد.(شکل ۳)

شکل۳ –برخورد باریکه الکترون به مبدل الکترون به فوتون

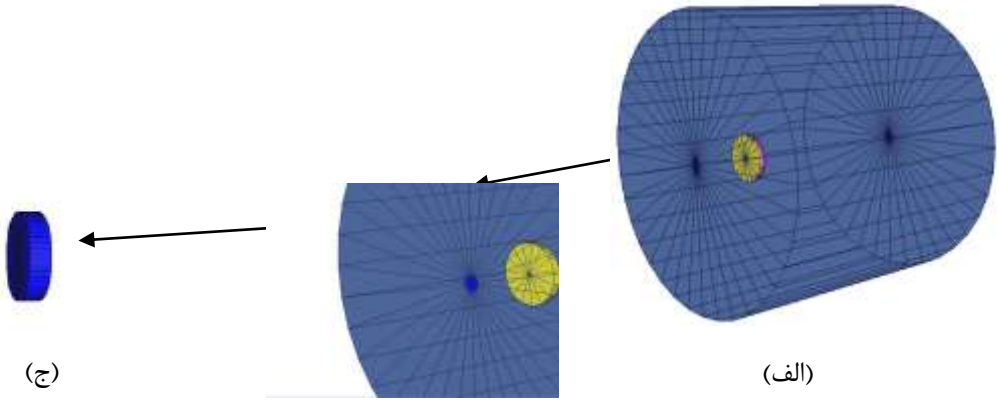
بر اساس نتایج (شکل ٤ و ٥) شعاع و ضخامت بهینه تنگستن به ترتیب ۱ سانتی‌متر و ۰/۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد تا از لحاظ طراحی (دقت اندازه‌گیری)، ساخت آن نیز امکان‌پذیر باشد. بدیهی است که افزایش ابعاد منجر به افزایش ناچیزی در بهره تولید می‌شود.



شکل٥ : بهره تولید فوتون به ازای شعاع‌ها و ضخامت‌های مختلف از مبدل الکترون به فوتون



شکل ٤ : مقایسه بهره تولید فوتون به ازای ضخامت بهینه شده در شعاع‌های مختلف

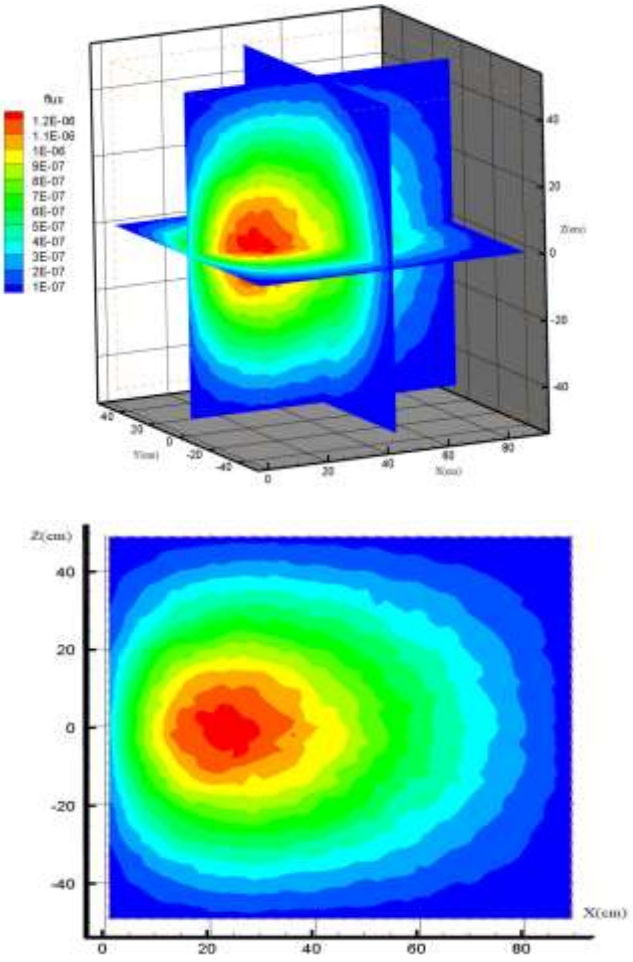


(الف) (ج)

شکل ٦ : الف) نحوه قرارگیری مس ٦٣ در مخزن آب سنگین- ب) محل قرارگیری تنگستن – ج) تنگستن(مبدل اکترون به فوتون)

همانطور که اشاره شد، تولید مس ٦٤ با جذب گامازا توسط نوترون حرارتی انجام می‌شود. برای این منظور از مخزن حاوی آب سنگین برای تولید فتونوترون و همزمان کندسازی و تولید نوترون حرارتی در حجم مخزن استفاده شد (شکل ٦). ابعاد مخزن آب سنگین استوانه‌ای به شعاع ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت ۹۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی با کد *MCNPX2.6*، بیشترین میزان شار نوترون‌های حرارتی(شکل ۷- الف و ۷- ب) در مخزن، در فاصله ۱۹ تا ۳۵ سانتی متری از قاعده‌ای که فوتون به آن برخورد می‌کند ایجاد میشود و تا شعاع ۸ تا ۹ سانتی متری توزیع می‌شود، لذا بهترین محل قرارگیری هدف‌های مسی در این موقعیت هاست.

ابعاد و هندسه هدف مسی نیز به صورت کره، نیم کره، کره توخالی، استوانه‌ای، صفحه‌های مسی در فواصل مختلف مورد بررسی قرار داده شدند. معیار انتخاب ابعاد بهینه مس نیز بیشینه تولید، اکتیویته در نظر گرفته شد. نتایج شبیه سازی کد، اکتیویته اشباع است. بنابراین با توجه به نیمه عمر مس و مدت زمان تابش، اکتیویته نهایی تولیدی محاسبه می شود (رابطه ۱).



شکل ۷ –الف) یک نمای کلی از فرایندی که در مخزن آب سنگین رخ می‌دهد (محدوده بیشترین بهره تولید نوترون حرارتی را نشان می‌دهد)، ب) محدوده‌ی دقیق قرارگیری مس ٦٣

$$A = A_{\circ}(1 - e^{-ln۲*\frac{t}{T_{\frac{۱}{۲}}}}) \qquad (۱)$$

اگر هدف مسی (استوانه با شعاع ۸ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر) را در فاصله‌ی ۲۱ سانتی‌متری از باریکه‌ی فوتون ورودی در مخزن آب سنگین قرار دهیم (شکل ۷–ب) میزان اکتیویته نهاییتولیدی (نیمه‌عمر ۱۲/۷ ساعت مس ٦٤، ٦٩/٢ درصد فراوانی طبیعی مس ٦٣ در هدف مسی) برابر ۲/۷ میلی کوری خواهد شد.

نتیجه‌گیری:

در این پژوهش امکان‌سنجی تولید رادیوایزوتوپ مس ٦٤ با استفاده از شتابدهنده‌ی خطی الکترون ۱۰ مگاالکترون‌ولتی با استفاده از کد MCNPX2.6 مطالعه و بررسی شده است. هدف تنگستی بصورت یک استوانه به شعاع ۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۰/۱۵ سانتی‌متر به عنوان مبدل فوتوالکترونی پشت یک مخزن حاوی آب سنگین (استوانه‌ای به شعاع ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت ۹۰ سانتی‌متر) قرار گرفت. این مخزن علاوه بر این که مولد فتونوترون است، نقش کندسازی نوترون‌ها و ایجاد نوترون حرارتی را نیز بر عهده دارد. بیشترین شار نورتون حرارتی در عمق ۱۹ تا ۳۵ سانتی‌متری و شعاع ۸ تا ۹ سانتی‌متری نسبت به محور مخزن استوانه‌ای ایجاد می شود که بهترین موقعیت برای قرار دادن هدف مسی است. در این کار از یک هدف مسی به شعاع ۸ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده شد که بعد از ۲ ساعت پرتودهی، بیشینه اکتیویتهٔ مس ٦٤ برابر با ۲/۷ میلی‌کوری را تولید میکند. بدیهی است با قرار دادن چندین هدف به طور همزمان می توان به اکتیویته های بالاتر دست یافت. همچنین با توجه به تولید همزمان مس ٦٧ می توان همزمان تولید دو رادیوایزوتوپ را برنامه ریزی کرد.

مراجع :

[1]-The Copper Radioisotopes: A Systematic Review with Special Interest to ^{64}Cu ; Artor Niccoli Asabella, et al. Hindawi Publishing Corporation, Volume 2014, Article ID 786463, 9 pages

[2]-^{64}Cu Production , ligands and biomedical applications ; Stewart Makkonen-Craig; University of Helsinki

[3]-www.oecd-nea.org/janis/book

[4]- طراحی و ساخت نخستین شتابدهنده پر قدرت صنعتی الکترون ایران : مقاله نامه اولین کنفرانس ملی شتابدهنده ها و کاربرد آنها ، علی محمد پورصالح و همکاران ، آذر ۹۲ , مجتمع پژوهشی یزد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران

[5]- Torabi, F., S.F. Masoudi, and F. Rahmani, “Photo neutron production by a 25 MeV electron linac for BNCT application”. Annals of Nuclear Energy, 2013. 54: p. 192-196

[6]-^{64}Cu, a powerful positron emitter for immunoimaging and theranostic: Production via natZnO and natZnO-NPs; Zahra Karimia , et al ; Applied Radiation and Isotopes 137 (2018) 56–61

[7]- Torabi, F., S.F. Masoudi, and F. Rahmani, “Photo neutron production by a 25 MeV electron linac for BNCT application”. Annals of Nuclear Energy, 2013. 54: p. 192-196

[8]- Modeling and experimental production yield of 64Cu with natCu and natCu-NPs in Tehran Research Reactor; Zahra Karimi , Mahdi Sadeghi , et al ; Nuclear Engineering and Technology 51 (2019) 269e274

[9]- 63Cu(n, γ) 64Cu Nuclear Reaction Cross-Section Measurement at Thermal Neutrons using isotopic Neutrons Sources for 64Cu Production; Laura Daraban, et al, Studia UBB Physica YSICA, Vol. 57(LVII), 2, 2012, pp. 3-12

[10] – تعقیبی خطبه‌سرا، علی؛ رحمانی، فائزه؛ قاسمی، فرشاد؛ " بهینه‌سازی روش تولید مولیبدن ۹۹ بر پایهشتابدهنده توان بالای خطی الکترون". کنفرانس فیزیک ایران، شهریور ۱۳۹٦ ، دانشگاه یزد. صفحه ۱۹۷۹تا ۱۹۸۲