

مقایسه نشت ذرات باردار و بدون بار از دستگاه پلاسمای کانونی جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی

هیوا رخزادی زردوئی^۱، مصطفی حسن‌زاده^{۲*}، سید محمود سادات کیائی^۳ و عبدالله رفاعی^۱

^۱گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

^۲پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۳پژوهشکده گداخت و پلاسمای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

*تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کدپستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹

پست الکترونیکی: mhasanzadeh@aeoi.org.ir

چکیده

در این پژوهش، به منظور محاسبه میزان پرتوایی رادیوایزوتوپ‌هایی مانند ^{11}C ، ^{15}O ، ^{18}F و $^{123,124}\text{I}$ در دستگاه پلاسمای کانونی جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی، از ذرات بدون بار نوترون و باردار پروتون با هدف‌های مکعبی از جنس نیتروژن، زینان، کربن و بور طبیعی جامد استفاده شده است. انرژی چشمه ذرات در ورودی برنامه از 1 MeV تا 10 MeV می‌باشد. هم‌چنین ضریب بهره کل ذرات حدود $Y_p \sim 10^{14}$ در نظر گرفته شده است. در این مقاله، به کمک کد ام سی ان پی ایکس^۱، میزان شار و انباشت انرژی ذرات نوترون و پروتون برای تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی در دستگاه پلاسمای کانونی محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع‌های جذب و رزونانس هدف‌های در نظر گرفته شده با انرژی نوترون‌ها و پروتون‌ها، مقدار افزایش شار ذرات خطی نمی‌باشد اما پس از انرژی تقریباً 10 MeV این شیب به دلیل ثابت بودن سطح مقطع تقریباً ثابت است. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش انرژی پروتون‌ها در این هدف‌ها، مقادیر انباشت انرژی پروتون‌ها به طور خطی افزایش می‌یابد اما بیش‌ترین مقدار آن برای هدف نیتروژنی و کم‌ترین مقدار آن برای هدف زینان به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع برهم‌کنش‌ها می‌باشد.

کلیدواژگان: پلاسمای کانونی، رادیوایزوتوپ، پرتوایی، بهره کل، کد ام سی ان پی.

۱. مقدمه

روش کار در این پژوهش به این صورت است که ابتدا با استفاده از این کد، مقدار انرژی اولیه چشمه مورد نظر، سطح مقطع‌های واکنش‌های مواد برخوردی و انرژی یون تشکیل شده و تعداد یون‌های برخوردی و غیره در نظر گرفته شده و سپس براساس داده‌های بدست آمده از طریق کد می‌توان مقدار شار ذرات و انباشت انرژی ایزوتوپ‌های مورد نظر را محاسبه نمود. برای این منظور ذرات باردار برای مثال پروتون، دوترون و یا تریون و ذرات بدون بار مانند نوترون به عنوان چشمه در محدوده انرژی‌های از ۱ تا چند مگاالکترون ولت می‌توان در نظر گرفت. این ذرات در اثر برخورد با اهداف جامد، مایع و گاز مانند نیتروژن، اکسیژن، کریپتون، آب، لیتیوم، گاز دوترون و غیره می‌تواند رادیوایزوتوپ‌های مختلفی از جمله کربن، اکسیژن، ید، فلورین و غیره تولید نمایند. [3,4]

۱.۲. تعریف سطح مقطع هدف‌های جامد براساس طیف انرژی

برای نشان دادن رابطه بین سطح مقطع برحسب انرژی، طیف چند نمونه سطح مقطع هدف‌های جامد برحسب انرژی برای ذرات چشمه‌های نوترون و پروتون در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

شکل (۱) انواع سطح مقطع‌های برهم‌کنش حاصل از نوترون با هدف زینان را نشان می‌دهد که شامل: سطح مقطع کل (آبی)، سطح مقطع پراکندگی کشسان (سبز)، سطح مقطع پراکندگی ناکشسان (قرمز)، سطح مقطع گیراندازی $(n,2n)$ (خاکستری)، سطح مقطع گیراندازی $(n,3n)$ (بنفش)، سطح مقطع گیراندازی پروتون (n,p) (آبی) و سطح مقطع گیراندازی آلفا (n,α) (زیتونی) می‌باشد.

همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در انرژی‌های کم‌تر از ۱ MeV، مقادیر سطح مقطع‌های کل و پراکندگی کشسان بالا می‌باشد و بیش از ۱۰ بارن است اما برای سطح مقطع‌های

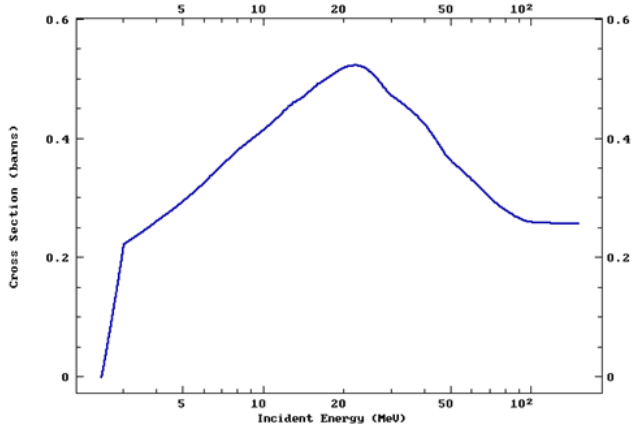
پژوهش‌های انجام شده در راستای تولید رادیوایزوتوپ‌ها از طریق دستگاه‌های پلاسمای کانونی نشان داده‌اند که اکثر این فعالیت‌های پژوهشی حول یک روش خلاصه می‌شود: تولید رادیوایزوتوپ‌های نیمه عمر کوتاه گداخت هسته‌ای [۱].

در این تحقیق، ما به بررسی نظری و شبیه‌سازی در خصوص دستگاه پلاسمای کانونی، با طراحی خاص، به عنوان یک دستگاه شتاب‌دهنده خواهیم پرداخت. عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی از دو مکانیزم گرما هسته‌ای و غیر گرما هسته‌ای برخوردار است. قابلیت محصورسازی پلاسمای گرما هسته‌ای و استفاده از هدف‌های مختلف گازی، مایع و جامد برای واکنش‌های هسته‌ای و نهایتاً تولید ایزوتوپ‌های نیمه عمر کوتاه در این مقاله پرداخته خواهد شد. در تمام موارد پژوهش، از سوخت هسته‌ای دوتریم D و یا تریوم T و از ایزوتوپ‌های هیدروژن استفاده خواهد شد. در خصوص به‌کارگیری هدف‌های مختلف امکان استفاده از هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه‌های نوترون و پروتون در این مقاله در نظر گرفته شده است.

۲. مواد و روش کار

در این تحقیق، از کد مونت‌کارلوی ام سی ان پی ایکس برای شبیه‌سازی هندسه سلول‌های مورد نظر، چشمه، هدف‌های جامد و غیره استفاده می‌شود. در این کد انواع خروجی‌ها شامل جریان، شار، انرژی و دز... قابل تعریف است. همچنین در این پژوهش، ابتدا برخورد نوترون با هدف‌های مکعبی به ابعاد 15×15 سانتی‌متر مربع و به ضخامت ۷ میلی‌متر از جنس نیتروژن، زینان، کربن و بور طبیعی با انرژی‌های از ۱ MeV تا ۱۴ MeV جهت محاسبه پارامترهای طیف شار و انباشت انرژی ذرات مورد بررسی قرار گرفته است [2].

حدود ۰/۶ بارن است و بعد از این انرژی، مقدار سطح مقطع کاهش می یابد.



شکل (۳): سطح مقطع برهم کنش پروتون با هدف نیتروژنی بر حسب انرژی.

۳. نتایج و بحث

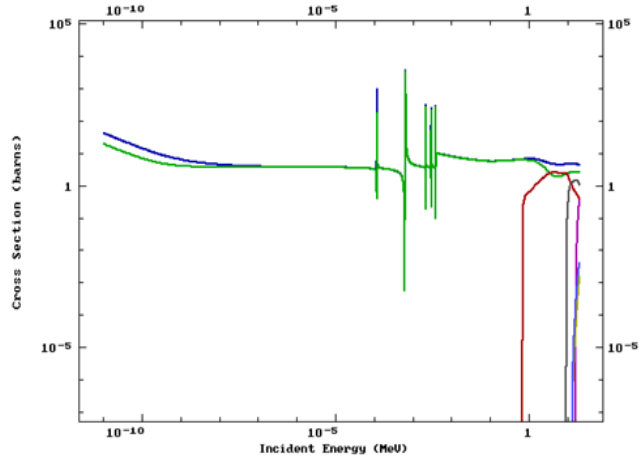
در این تحقیق، پارامترهای فیزیکی زیر از طریق کد ام سی ان پی ایکس، محاسبه شده که شامل موارد زیر می باشد:

- طیف شار ذرات خارج شده از هدف مکعبی بر حسب انرژی.
- طیف انباشت انرژی ذرات در داخل هدف مکعبی بر حسب انرژی.

لازم به ذکر است کد از فایل کتابخانه^۱ برای محاسبات پارامترها استفاده می کند. علاوه بر این، در تمام محاسبات مقدار خطای حاصل از کد کم تر از ۰/۷٪ است.

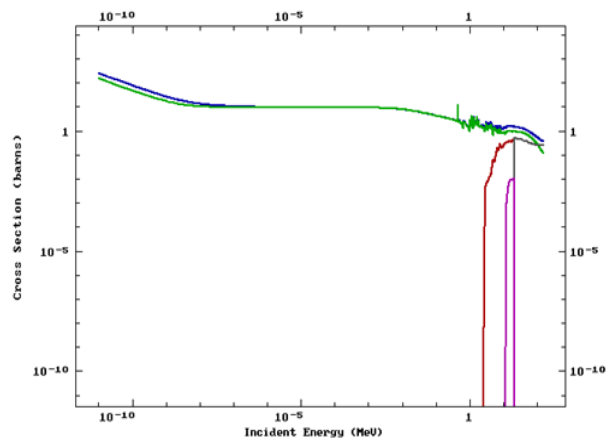
شکل (۴) مقادیر شار نوترون های خارج شده از هدف های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه نوترون بر حسب انرژی را نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد مقدار بیشینه شار نوترون ها بیش تر در انرژی های بالا است و در هدف های نیتروژن و زینان به دلیل بالا بودن اعداد جرمی و اتمی بیش تر از دو هدف دیگر می باشد. همچنین این شکل نشان می دهد که با افزایش انرژی نوترون ها در این هدف، مقدار شیب شار نوترون ها در ابتدا به دلیل متفاوت بودن

پراکندگی ناکشسان، گیراندازی $(n,2n)$ ، $(n,3n)$ ، (n,p) و (n,α) انرژی آستانه واکنش بیش از ۱ MeV می باشد.



شکل (۱): سطح مقطع برهم کنش نوترون با هدف زینان بر حسب انرژی.

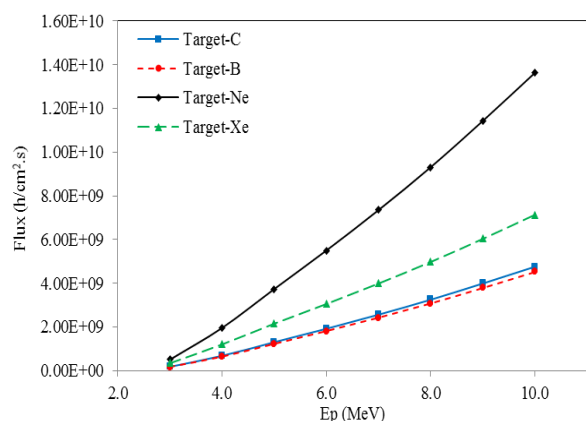
شکل (۲) انواع سطح مقطع های برهم کنش حاصل از نوترون با هدف نیتروژن را نشان می دهد که شامل: سطح مقطع کل (آبی)، سطح مقطع پراکندگی کشسان (سبز)، سطح مقطع پراکندگی ناکشسان (قرمز)، سطح مقطع جذب (خاکستری) و سطح مقطع گیراندازی $(n,2n)$ (بنفش) می باشد.



شکل (۲): سطح مقطع برهم کنش نوترون با هدف نیتروژن بر حسب انرژی.

هم چنین شکل (۳) سطح مقطع برهم کنش پروتون با هدف نیتروژنی را نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد مقدار سطح مقطع در تمام انرژی های پروتون کم تر از یک بارن است. بیشینه سطح مقطع در انرژی ۲۰ MeV می باشد که در

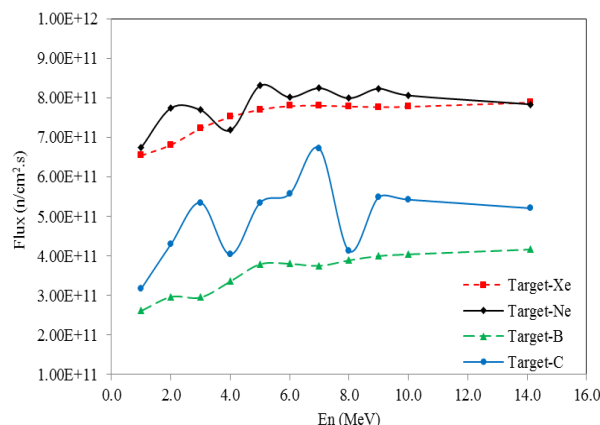
^۱ENDF/B-IV



شکل (۵): مقادیر شار پروتون‌های خارج شده از هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه پروتون برحسب انرژی.

در ادامه این مطالعه، طیف انباشت انرژی ذرات در داخل هدف‌های مکعبی برای ۴ عنصر مورد تحقیق برای چشمه ذرات برحسب انرژی آن‌ها محاسبه شده و در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. شکل (۶) مقادیر انباشت انرژی نوترون‌ها در داخل هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه نوترون برحسب انرژی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش انرژی نوترون‌ها، مقدار انباشت انرژی در داخل هدف جامد نیتروژن، در ابتدا به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع‌های جذب و رزونانس (شکل‌های ۱، ۲ و ۳) در انرژی‌های مختلف، دارای نوسان می‌باشد اما پس از انرژی 10 MeV مقدار آن به طور خطی افزایش می‌یابد. ولی برای هدف جامد مکعبی زینان با افزایش انرژی نوترون‌ها، در ابتدا مقدار شیب انباشت انرژی نوترون‌ها در داخل هدف افزایش می‌یابد اما پس از انرژی 10 MeV به دلیل نشت نوترون‌های پراثری کاهش می‌یابد. هم‌چنین همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در داخل هدف‌های کربن و بور با افزایش انرژی نوترون‌ها، مقدار انباشت انرژی به طور خطی افزایش می‌یابد.

سطح مقطع‌های جذب و رزونانس (شکل‌های ۱، ۲ و ۳) این مواد در انرژی‌های مختلف متفاوت می‌باشد اما پس از انرژی 10 MeV این شیب تقریباً ثابت می‌شود به دلیل ثابت بودن سطح مقطع در این انرژی است.

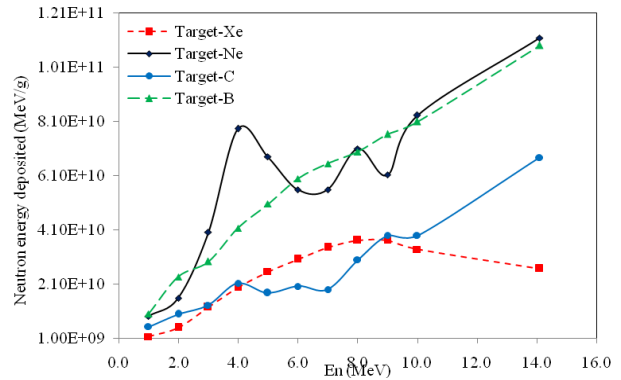


شکل (۶): مقادیر شار نوترون‌های خارج شده از هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه نوترون برحسب انرژی.

در این مقاله هم‌چنین مقادیر شار پروتون‌های خارج شده از هدف مکعبی برای چشمه پروتون برحسب انرژی محاسبه شده است که در شکل (۵) نشان داده شده است. در این مرحله برخورد ذرات چشمه پروتون با همین هدف‌ها اما با انرژی‌های از 3 MeV تا 10 MeV به منظور محاسبه پارامترهای مذکور، تکرار شده است که نتایج بدست آمده در پایین آورده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد مقدار بیشینه انرژی پروتون 10 MeV در نظر گرفته شده است. هم‌چنین با افزایش انرژی پروتون‌ها در این هدف‌ها، مقادیر شار پروتون‌ها به طور خطی افزایش می‌یابد. همان‌طور که می‌دانیم با افزایش انرژی پروتون مقدار شار آن افزایش می‌یابد.

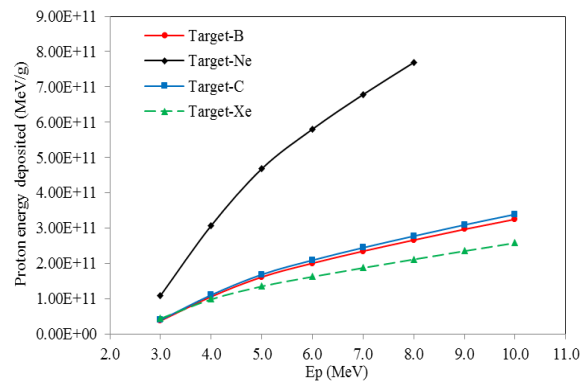
۴. نتیجه گیری

در این پژوهش برای رسیدن به هدف اصلی یعنی تولید رادیویزوتوپ‌های پزشکی با استفاده از برهم‌کنش ذرات باردار (پروتون) و بدون بار (نوترون) پر انرژی با هدف‌های گازی، مایع و یا جامد در دستگاه پلاسمای کانونی مراحل زیر انجام گرفته است. ابتدا مشخصات و ابعاد هندسی مسئله و ویژگی‌های چشمه ذرات برهم‌کنش‌کننده مورد نظر تعریف شد سپس با استفاده از کد ام سی ان پی ایکس نسخه ۲/۷ پارامترهای شار و انباشت انرژی نوترون‌ها محاسبه شد. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش انرژی نوترون‌ها در این هدف‌ها مقدار شیب شار نوترون‌ها در ابتدا به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع‌های جذب و رزونانس متفاوت می‌باشد اما پس از انرژی تقریباً ۱۰ MeV این شیب به دلیل ثابت بودن سطح مقطع تقریباً ثابت است. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش انرژی پروتون‌ها در این هدف‌ها، مقادیر انباشت انرژی پروتون‌ها به طور خطی افزایش می‌یابد اما بیش‌ترین مقدار آن برای هدف نیتروژنی و کم‌ترین مقدار آن برای هدف زینان به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع برهم‌کنش‌ها می‌باشد.



شکل (۶): طیف انباشت انرژی نوترون‌ها در داخل هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه نوترون برحسب انرژی.

شکل (۷) مقادیر انباشت انرژی پروتون‌ها در داخل هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه پروتون برحسب انرژی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش انرژی پروتون‌ها در این هدف‌ها، مقادیر انباشت انرژی پروتون‌ها به طور خطی افزایش می‌یابد اما بیش‌ترین مقدار آن برای هدف نیتروژنی و کم‌ترین مقدار آن برای هدف زینان به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع برهم‌کنش‌ها می‌باشد.



شکل (۷): طیف انباشت انرژی پروتون‌ها در داخل هدف‌های جامد مکعبی نیتروژن، زینان، کربن و بور برای چشمه پروتون برحسب انرژی.

۵. مراجع

- [1] S. M. Sadat Kiai, S. Adlparvar, S. Sheibani, M. Elahi, A. Safarien, S. Farhangi, A. R. Zirak, S. Alhooie, B. N. Mortazavi, M. M. Khalaj, A. R. Khanchi, A. A. Dabirzadeh, A. Kashani, F. Zahedi, Design a 10 kJ IS Mather Type Plasma Focus for Solid Target Activation to Produce Short-Lived Radioisotopes $^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$, J Fusion Energ (2010) 29:421–426, DOI 10.1007/s10894-010-9298-7.
- [2] F. Tabbakh S. M. Sadat Kiai, M. Pashaei, Conceptual achievement of 1GBq activity in a Plasma Focus driven system, Applied Radiation and Isotopes 129 (2017) 211–214.
- [3] F. Ditroi, F. Tarkanyi, S. Takacs, Gas, Liquid and Molten Targets at Cyclotron Beams: Target Systems and Related Nuclear Database, 2010.
- [4] D.B. Pelowitz, MCNPX 2.7.0 manual, LANL, LA-CP-07-1473. Los Alamos National Laboratory, 2008.