بررسی پارامترهای تولید رادیو ایزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ تحت واکنش $^{89}Y(p,n)^{89}Zr$

مرتضی تقی لو*[۱]، یوسفعلی عابدینی[۲،۳]، طیب کاکاوند[۴]، مهدی صادقی[۵]

۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، *mtaghilo@znu.ac.ir*

۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، *abediniy@znu.ac.ir*

۳ پژوهشکده تغییر اقلیم و گرمایش زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

۴ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران ، *Tayeb@znu.ac.ir*

۵ گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی ایران، تهران، ایران ، *sadeghi.m@iums.ac.ir*

* نویسنده مسئول

چکیده

با توجه به اهمیت تشخیص به موقع و درست سرطان و اقدام به موقع برای درمان و همچنین درمان با عوارض هر چه کمتر باعث گردیده که متخصصین دنبال این نوع روش‌ها یا درمان‌ها بروند و این امر از طریق تولید رادیو ایزوتوپ‌های مناسب امکان پذیر است. در این کار پس از معرفی روش‌های تولید زیرکونیوم-۸۹ و بررسی انواع واکنش‌های منجر به تولید زیرکونیوم-۸۹، بهترین واکنش برای تولید زیرکونیوم-۸۹ با توجه به امکانات موجود در کشور تعیین گردیده است. در این تحقیق تابع برانگیختگی تولید زیرکونیوم-۸۹ برای واکنش هسته‌ای $^{89}Y(p, n)^{89}Zr$، با استفاده از کد هسته‌ای TALYS-1.0 محاسبه گردید و با مطالعات تجربی مقایسه گردیده است. ضخامت مورد نیاز هدف (ایتریم-۸۹) برای بمباران پروتونی با کد هسته‌ای سریم (SRIM) محاسبه شده است. در نتیجه پارامترهای تولید زیرکونیوم-۸۹ برای رسیدن به بهترین بازده ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: ایتریم -۸۹، تابع بر انگیختگی، سیکلوترون، رادیو ایزوتوپ، زیرکونیوم-۸۹.

۱- مقدمه

رادیوایزوتوپ‌هایی وجود دارندکه کاربردشان در علم و تکنولوژی هر روز افزایش می‌یابد برخی ازآنها که تابش کننده پوزیترون با عمرکوتاه هستند ($^{11}C(T_{1/2}$=20. min)، $^{15}O(T_{1/2}$=2.0 min) و $^{18}F(T_{1/2}$=110 min) در تصویربرداری با استفاده ازگسیلنده پوزیترون(PET) کاربرد دارند و برخی دیگر که تابش‌کننده پوزیترون با عمر زیاد هستند، در فرایندهای متابولیک کند و پخش آنتی‌بادی‌ها کاربرد دارند. زیرکونیوم-۸۹ (۰/۸۹۷MeV= E_{β}+ ,$T_{1/2}$=79.4h ,EC=%77و I_{β}+=%۲۳) یکی ازمهمترین و مناسبترین تابش کننده‌های پوزیترون می‌باشد و در پزشکی هسته‌ای کاربرد پیدا می‌کند. زیرکونیوم-۸۹ در پزشکی هسته‌ای برای تشخیص و درمان تومور و همچنین در بررسی فعالیت عناصر موثر در حیات جانداران (Bio-Kinetic) کاربرد فراوان دارد. برای مطالعه فرایندهای متابولیک کند، تابش کننده‌های +β با نیمه عمر طولانی لازم است. زیرکونیوم- ۸۹ یکی از آنها می‌باشد که توسط برین[۱] و لینک[۲] به عنوان مناسبترین تابش‌کننده پوزیترون برای نشاندار کردن آنتی‌بادی‌ها پیشنهاد شد. این رادیونوکلوئید همچنین با داشتن نیمه عمر ۷۸/۴۱ ساعت و ۲۳ درصد تابندگی پوزیترون برای نشاندار کردن مونوکلونال آنتی‌بادی‌ها برای تصویر برداری تومور مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۳و۲و۱]. زیرکونیوم طبیعی شامل چهار ایزوتوپ، زیرکونیوم-۹۰ با فراوانی ۵۱/۴۵ درصد، زیرکونیوم-۹۱ با فراوانی ۱۱/۲ درصد، زیرکونیوم-۹۲ با فراوانی ۱۷/۱۵ درصد و زیرکونیوم-۹۴ با فراوانی ۱۷/۳۸ درصد می‌باشد. محققان سطح مقطع تولید زیرکونیوم-۸۹ را ازطریق واکنش‌های مختلف بررسی کرده و داده‌های مختلفی را به دست آورده‌اند. یودین[۳] و همکارانش روی واکنش$^{89}Y(p, n)^{89}Zr$، کار کرده‌اند بطوریکه بازه انرژی را از ۴ تا ۷۹ مگاالکترون ولت در نظر گرفتند که در آن بیشترین سطح مقطع ۸۰۵ میلی بارن در۱۵.۸مگاالکترون ولت می‌باشد[۳]. کاندیل[۴] و همکارانش واکنش $^{nat}Sr(\alpha, n)^{89}Zr$ را بررسی نموده اند که در آن بازه انرژی از ۱۵ تا ۳۰ مگاالترون ولت می‌باشد که بیشترین سطح مقطع در ۲۵ مگاالکترون ولت ،۷۰ میلی بارن می‌باشد[۲].

یودین و همکارانش در مقاله دیگری واکنش$^{nat}Zr(p, pxn)^{89}Zr$مورد بررسی قرار داده‌اند که در آن بازه انرژی را از ۴ تا ۵۰ مگاالکترون ولت در نظر گرفته‌اند که بیشترین سطح مقطع ۵۵۱ میلی بارن در ۲۸.۷۹ مگاالکترون ولت می‌باشد[۱].

---

۱ *Brien*

۲ *Link*

۳ M. S. Uddin

۴ *S*.A.Kandil

۲- روش شناسی

کدهای مختلفی نظیر GROGI, STAPRE, ALICE, TALYS, GNASH, SPEC و اصلاحاتشان بر اساس مکانیسم واکنش تعادل و پیش از تعادل توسعه یافته‌اند. این کدها از نظر فیزیکی مشابه بوده و تفاوت‌هایی در پیچیدگی تهیه داده‌های ورودی و زمان لازم برای محاسبه دارند.

یکی از این کدها، کد TALYS-1.0 [5] بوده که به منظور بررسی و مطالعه واکنش‌های هسته‌ای نوشته شده است. کد محاسباتی TALYS-1.0 یک برنامه کامپیوتری برای واکنش‌های هسته‌ای می‌باشد که در NRG Petten فرانسه تهیه شده است. این کد قادر به شبیه سازی واکنش‌های هسته‌ای که ذره پرتابه آن‌ها، نوترون، فوتون، پروتون، دوترون، تریتون، ^{3}He و آلفا در بازه انرژی ۱ کیلوالکترون ولت تا ۲۰۰ مگاالکترون ولت برای هسته‌هایی که جرم آنها حداقل ۱۲ است، می‌باشد. فایل ورودی کد TALYS-1.0 تنها به ۴ داده (واژه کلیدی) نیاز دارد. این واژه‌ها عبارتند از ۱- نام ذره پرتابه ۲- نام عنصر هدف ۳- عدد جرمی هدف ۴- انرژی ورودی ذره پرتابه. کد TALYS-1.0 می تواند سطح مقطع کل تولید یک ایزوتوپ را که از کانال‌های مختلف در یک عنصر طبیعی تولید می‌شود، محاسبه کند. همچنین قادر به محاسبه سطح مقطع تولید حالت‌های برانگیخته یک ایزوتوپ می‌باشد.

این کد نسبت به کد ALICE دارای توانایی بیشتر می‌باشد و همچنین اجرای برنامه کد TALYS-1.0 ساده‌تر از کد ALICE می باشد. کدهای کامپیوتری متعددی برای محاسبه $\frac{dE}{dx}$ و همچنین برد ذره پرتابی نوشته شده‌اند. کدSRIM (Stopping Ranges of Ions in Matter) یک برنامه شبیه سازی مونت کارلو برای بررسی نفوذ یون‌ها به مواد است که به حل عددی معادله‌های دیفرانسیلی با استفاده از رفتار کوانتوم مکانیکی برخودهای یون-اتم پرداخته و قدرت توقف جرمی، یعنی $\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}$ را محاسبه می‌کند. کد SRIM توسط زیگلر[۱] و همکارانش بر اساس تئوری LSS[۲] نوشته شده است. گستره انرژی یون از ۱۰ eV تا ۲ GeV بر واحد جرم اتمی است. خروجی کد SRIM توزیع نهایی یون‌ها و محاسبه پدیده‌های مرتبط با افت انرژی یونها می‌باشد.

در ورودی کد بایستی داده‌هایی چون نوع ذره پرتابی، نوع هسته هدف، دانسیته (چگالی) اتمی و انرژی ذره پرتابی وارد گردد. خروجی کد، میزان $\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}$ را در هر انرژی (و همچنین برد ذره) را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این پروژه از نسخه SRIM2006 که توسط برساک[۳] و زیگلر [4] اصلاح شده، به منظور محاسبه میزان افت انرژی استفاده شد.

---

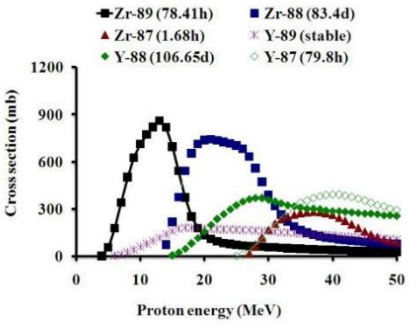
۱. *Ziegler*

۲. *Lindhard, Scharff and Schiott*

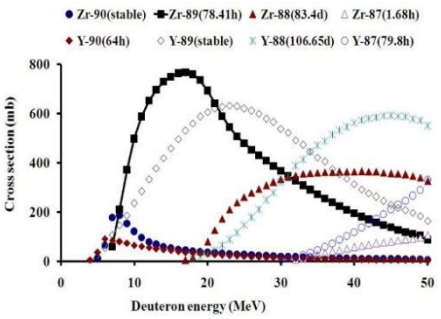
۳. *Biersack*

۳- نتایج

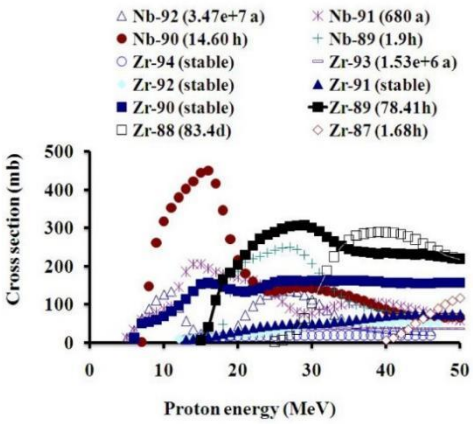
بر اساس داده‌های بدست آمده از اجرای کد TALYS-1.0 شکل‌های۱تا ۵ رسم شده است. شکل۱، رادیو ایزوتوپ‌های تولید شده زیرکونیوم را نشان می‌دهد. زیرکونیوم-۸۸ و زیرکونیوم-۸۷ با روش‌های شیمیایی از زیرکونیوم-۸۹ جدا نمی‌شوند در نتیجه باید انرژی پروتون کمتر از انرژی آستانه تولید این دو ایزوتوپ باشد. لذا انرژی پروتون باید کمتر از۱۴ مگا الکترون ولت باشد. همچنین بیشترین سطح مقطع برای واکنش$^{89}Y(p, n)^{89}Zr$، ۸۶۰ میلی بارن در انرژی پروتونی ۱۳ مگا الکترون ولت است و از ایزوتوپ‌های تولید شده توسط بمباران ایتریم-۸۹، ایزوتوپهای ایتریم-۸۹ با انرژی آستانه تولید ۴ مگا الکترون ولت در بازه انرژی ۱۴-۴ مگا الکترون ولت واسترانسیوم-۸۶ با انرژی آستانه۱۲ مگا الکترون ولت و همچنین استرانسیوم-۸۸ با انرژی آستانه ۱۴ مگا الکترون ولت تولید می‌شود، که با روش‌های شیمیایی قابل جداسازی است. لذا با توجه به نتایج حاصل از اجرای کد TALYS-1.0 در بازه انرژی ۱۴-۵ مگا الکترون ولت برای تولید زیرکونیوم-۸۹ هیچ ناخالصی غیر قابل رفع وجود ندارد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از کد TALYS-1.0 و مقایسه آن با داده‌های تجربی (شکل۶) نشان می‌دهد که اگر انرژی پروتون بین ۱۴-۵ مگا الکترون ولت باشد، بیشترین تولید زیرکونیوم۸۹ را داریم. بقیه واکنش‌ها با توجه به شکل‌های ۲، ۳، ۴ و۵ دیده می‌شود که در بازه انرژی که تولید زیرکونیوم-۸۹ بیشترین است، ناخالصی‌های ایزوتوپی زیرکونیوم وجود دارد. از آنجایی که جداسازی آنها از زیرکونیوم-۸۹ ممکن نیست لذا واکنش‌های مناسبی برای تولید این رادیودارو نیستند. ضخامت مورد نیاز هدف برای تمام واکنش‌ها بجز واکنش$^{89}Zr(n, 2n)^{90}Zr$که در آن کد SRIM برای ذره نوترونی نمی‌تواند اجرا شود، محاسبه شد. محاسبات بر این اساس بوده است که پرتابه فرودی با انرژی مطلوب و زاویه تابش ۶ درجه نسبت به سطح هدف وارد لایه هدف شده، طوری خارج شود که کاهش انرژی مورد نظر را تامین کند. ضخامت‌های بدست آمده در جدول ۱ آورده شده‌اند.

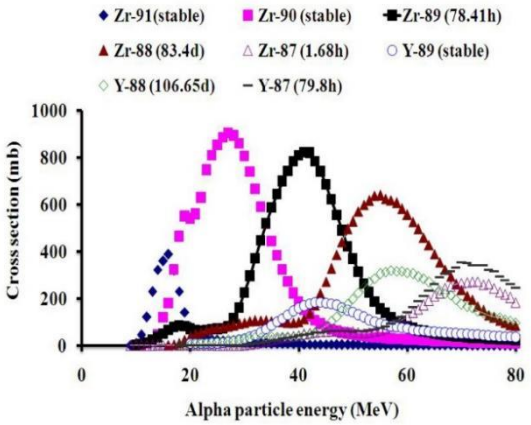


شکل ۱.تابع برانگیختگی برای $^{89}Y(p,n)^{89}Zr$

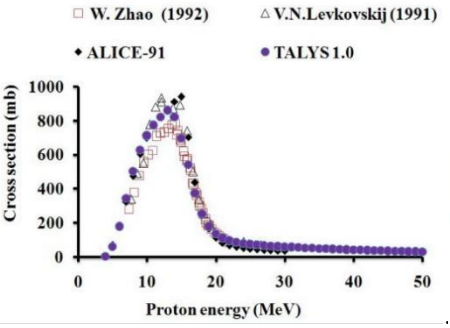


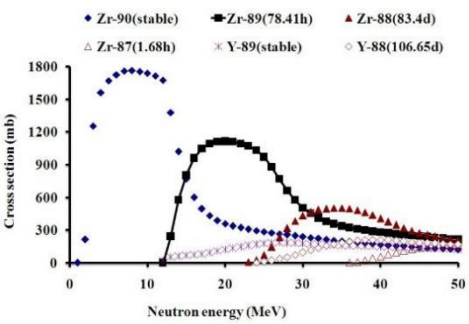
شکل ۲. تابع برانگیختگی برای واکنش $^{89}Y(d,2n)^{89}Zr$





شکل ۳. تابع برانگیختگی برای واکنش $^{nat}Sr(a,xn)^{89}Zr$ **شکل ۴. تابع برانگیختگی برای واکنش** $^{nat}Zr(p,pxn)^{89}Zr$





شکل ۵. تابع برانگیختگی برای واکنش $^{90}Zr(n,2n)^{89}Zr$ **شکل۶. مقایسه سطح مقطع زیرکونیوم-۸۹ در کانال *(p, n)***

جدول ۱ ضخامت هدف برای تولید ^{89}Zr با استفاده از کد *SRIM*

واکنش	$^{89}Y(p,n)^{89}Zr$	$^{89}Y(d,2n)^{89}Zr$	$^{86}Sr(\alpha,xn)^{89}Zr$	$^{nat}Zr(p,pxn)^{89}Zr$	$^{90}Zr(n,2n)^{89}Zr$
گستره انرژی *(MeV)*	۵-۱۴	۱۰-۱۵	۳۰-۴۰	۲۰-۴۰	۱۵-۲۵
ضخامت پیشنهاد شده*(μm)*	۷۶۸.۷۲	۳۲۳.۲۶	۳۴۹.۳۴	۲۹۹۰	-

جدول۲. واکنش‌های هسته‌ای تولید زیرکونیوم-۸۹

واکنش هسته ای	انرژی ذره فرودی(Mev)	در صد فراوانی هدف
$^{89}Y(p,n)^{89}Zr$	۵-۱۵	۱۰۰
$^{89}Y(d,2n)^{89}Zr$	۱۰-۱۵	۱۰۰
$^{nat}Sr(\alpha, n)^{89}Zr$	۳۰-۵۰	-
$^{nat}Zr(p,pxn)^{89}Zr$	۲۰-۴۰	-
$^{90}Zr(n,2n)^{89}Zr$	۱۵-۲۵	۵۱.۴۵

۴- نتیجه گیری

سیکلوترون پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج توانایی شتاب دادن پروتون تا ۳۰ مگا الکترون ولت و دوترون تا ۱۵ مگا الکترون ولت را دارد. لذا از واکنش‌های منجر به تولید زیرکونیوم-۸۹ که در جدول۲ ذکر شد، تنها واکنش‌های اول و دوم برای ما امکان‌پذیرمی‌باشند. واکنش دوم با توجه به بازه انرژی ۱۵-۱۰ زیرکونیوم-۹۰ تولید می‌شود که امکان جداسازی آن از زیرکونیوم-۸۹ وجود ندارد و یا بسیار مشکل است. در نتیجه تنها واکنش اول با بهره تولید بالا برای ما امکان پذیر می‌باشد. با توجه به داده‌های بدست آمده از اجرای کد TALYS-1.0 می‌توان با بمباران هدف توسط پروتون با انرژی ۱۴-۵ مگا الکترون ولت زیرکونیوم-۸۹ با کمترین ناخالصی، تولید کرد. از آنجا که داده‌های حاصل از اجرای کد TALYS-1.0 (محاسبات تئوری) و مطالعات تجربی (نمودار۶) توافق خوبی با هم داشتند، این تحقیق که امکان سنجی تولید زیرکونیوم-۸۹ با شتابدهنده سیکلوترون بوده است، با موفقیت به انجام رسید. لذا امکان تولید این رادیو داروها با فناوری موجود امکان پذیر بوده و این نوید دهنده یک روش تشخیصی دقیق و به موقع تومورهای سرطانی و درمان با عوارض کمتر است.

مراجع

[1] Uddin M.S., Khandaker M.U., KIM K.S., Lee Y.S., Lee M.W.,Kim G.N. , Excitation function of the proton induced nuclear reaction on natural zirconium,nuclear Instruments and Methods in physics Reserch B , 266 , 13-20,2008,.

[2] Kandil S.A. , Spahn I. , Scholten B. , Saleh Z.A. , Saad S.M.M. ,Coenen H.H,Qaim S.M. , Excitation function of (a,xn)reaction on ^{nat} Rb and ^{nat}Sr from threshold up to 26 Mev:Possibilty of production of ^{87}Y, ^{88}Y and^{89}Zr,Applied Radiation and Isotopes. 65, 561-568, 2007.

[3] Uddin M.S, Hagiwara M, Bba M, Tarakanyi F, Ditroi F,Experimental studies on excitation function of the proton-induced activation reaction on yttrium, Applied Radiation and Isotopes. 63,367-374,2005.

[4] Ziegler, J. F., Biersack, J. P., Littmark, U.; The code of SRIM–the Stopping and Range of Ions in Matter. IBM-Research, New York USA, 2003.

[5] Koning A.J., Hilaire S. and Duijvestijn M.C.; TALYS-1.0; International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007. DOI: 10.1051/ndata:07767