

مقایسه بهره تولید رادیوایزوتوپ مس-61 از طریق واکنش‌های $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ ، $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ ، $^{61}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ و $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ در سیکلوترون‌های بی‌مارستانی با استفاده از کدهای هسته‌ای TALYS، EMPIRE و MCNPX

مائده حسینی^۱، علی‌رضا آزادبهر^{۲*}

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

چکیده

پیش‌زمینه و هدف: مس-61 (^{61}Cu) رادیوایزوتوپ با نیمه‌عمر 3/33 ساعت است که با گسیل β^+ (61 درصد) و با گریزاندازی الکترون (39 درصد) به ایزوتوپ نی-61 واپاشی می‌شود. از این رادیوایزوتوپ می‌توان در بررسی خون‌رسانی قلب و تصویربرداری از بافت‌های سرطانی کم‌اکسیژن با PET استفاده کرد. ^{61}Cu عمدتاً از طریق بمباران هدف‌هایی از جنس روی (Zn)، نیکل (Ni) و کبالت (Co) در سیکلوترون‌های متوسط تولید می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی بهره تولید ^{61}Cu تحت واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ ، $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ در سیکلوترون‌های بی‌مارستانی بود.

مواد و روش کار: در این مطالعه مداخله‌ای، توابع برانگیختگی این واکنش‌ها توسط کدهای TALYS-1/96 و EMPIRE-3-2-2 محاسبه شده و بهترین انرژی با بیشترین سطح مقطع واکنش و کمترین ناخالصی تولیدی، تعیین شد. توان ایستادن‌گی و ضخامت هدف در انرژی انتخابی توسط کد SRIM-2013 محاسبه شد. بهره تولید ^{61}Cu با انتگرال‌گیری از فرمول بهره تولید در محیط MATLAB به دست آمد و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی MCNPX-2/6 و نتایج تجربی مقایسه شد.

یافته‌ها: حداکثر بهره حاصل از کد TALYS برای واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ ، $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ ، $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ به ترتیب در انرژی‌های 14، 14، 9 و 20 MeV برابر با 113/29، 55/07، 498/51 و 46/51 MBq/ μAh بود. حداکثر بهره حاصل از کد EMPIRE برای واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ به ترتیب در انرژی‌های 14 و 9 MeV برابر با 183/24 و 497/21 MBq/ μAh بود. حداکثر بهره حاصل از کد MCNPX برای واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ در انرژی‌های 14 و 9 MeV به ترتیب برابر با 90/73 و 470/26 MBq/ μAh بود. حداکثر بهره تجربی واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ در انرژی‌های 14 و 9 MeV به ترتیب برابر با 155 و 461/32 MBq/ μAh بود.

بحث و نتیجه‌گیری: از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی می‌توان دریافت که این نتایج در واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ در انرژی 9 MeV توافق خوبی باهم دارند و این واکنش در این انرژی، بهترین واکنش برای تولید ^{61}Cu در سیکلوترون‌های بی‌مارستانی است.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای- پرتوپزشکی، گروه مهندسی پرتوپزشکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران
^۲ استادیار مهندسی هسته‌ای- پرتوپزشکی، گروه مهندسی پرتوپزشکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران (نویسنده مسئول)

کلیدواژه ها: مس-61، سی‌کلوترون بی‌مارستان‌ی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نی‌کل، بهره‌تولیدی، روی

مجله مطالعات علوم پزشکی، دوره سی و سوم، شماره دوازدهم، ص 823-838، اسفند 1401

آدرس مکاتبه: لاهیجان، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلام ی واحد لاهیجان، تلفن: 09112363159

Email: azadbar@liau.ac.ir

مقدمه

معادل $1/22 \text{ MeV}$ و در 39 درصد از موارد با گایراندازی الکترون به ای‌زوتوپ پایدار نی‌کل-61 (^{61}Ni) واپاشی می‌کند. فوتون‌های شاخص تابش شده از آن، گاماها 283 KeV ($12/2$) درصد، 656 KeV ($10/77$) درصد، و تابش نابودی 511 KeV (120) درصد هستند. مس دو ظرفیتی به واسطه خاصیت عالی کمپلکس‌پذیری، به راحتی کمپلکس‌های مسطح چربی‌دوست فاقد بار الکتریکی ایجاد می‌کند؛ در نتیجه از ^{61}Cu می‌توان در بررسی خون‌رسانی قلب و تصویربرداری از بافت‌های سرطانی کم‌اکسیژن استفاده کرد. علاوه بر این، این رادیوایزوتوپ به واسطه تابش ذره‌ای (e^+) و همچنین در ترکیب با بعضی از مولکول‌ها مانند مولکول آلی 8- هی‌دروکسی‌کینولین در کنار خاصیت تصویربرداری، می‌تواند به‌عنوان یک عامل درمانی در درمان بعضی از بدخیمی‌ها مانند درمان لوکم‌ی، مورد استفاده قرار گیرد. ^{61}Cu به واسطه درصد تابش β^+ بیشتر نسبت به سایر رادیوایزوتوپ‌های مس، تصاویری با وضوح بالاتر به دست می‌دهد، در حالی که دوز تابشی آن در مقایسه با رادیو داروی پرکاربرد ^{18}FDG قابل قبول است (1). نیمه‌عمر نسبتاً طولانی ^{61}Cu در مقایسه با رادیوایزوتوپ رایج ^{18}F (با نیمه‌عمر 110 دقیقه) به

امروزه پزشکی هسته‌ای تشخیصی یکی از بازوهای مهم پزشکی به حساب می‌آید که با استفاده از دو ابزار تصویربرداری توموگرافی کامپیوتری گسیل تک فوتون (SPECT) و توموگرافی گسیل پوزیترون (PET)، نقش بسزایی را در تشخیص بیماری‌ها، مخصوصاً انواع سرطان، ایفا می‌کند. در حال حاضر تکنسیوم-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) و فلئور-18 (^{18}F) پرکاربردترین رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده به ترتیب در SPECT و PET هستند. علاوه بر این دو رادیوایزوتوپ که می‌توان گفت بهترین رادیوایزوتوپ‌های شناخته‌شده برای تصویربرداری پزشکی هسته‌ای هستند؛ رادیوایزوتوپ‌های دیگری نیز بسته به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و پرتویی به صورت اختصاصی برای این سیستم‌های تصویربرداری توسعه پیدا کرده‌اند و در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این رادیوایزوتوپ‌ها، مس-61 (^{61}Cu) است که به واسطه تابش β^+ از رادیو داروهای اختصاصی آن در تصویربرداری PET استفاده می‌شود (1). ^{61}Cu رادیوایزوتوپ با نیمه‌عمر فیزیکی 3/33 ساعت است که در 61 درصد از موارد با گسیل β^+ با انرژی

ترکیب‌های آن‌ها باعث تجمع و سمیت در به افت‌ها می‌شود؛ اتم‌های مسی که از ترکیبات آن جدا شده است، به سرعت از سلول‌های نرموکسیک خارج می‌شوند و سمیتی ایجاد نمی‌کنند (3, 4). با قبول اهمیت ^{61}Cu در تصویربرداری PET، مس‌ی‌ر تول‌ید آن باید بهینه شود.

تول‌یدکنندگان اجازه می‌دهند تا جداسازی شیمی‌ی‌ایی و نشاندارسازی دارو را بدون از دست دادن حجم زیادی از پرتوزایی ^{61}Cu به پای‌ان برسانند؛ علاوه بر این، امکان تصویری‌برداری از فرآیندهای متابولی‌ک کندتر در بدن را نیز فراهم می‌کند (2). برخلاف سایر عناصر که تجزیه

جدول (1): رادی‌وای‌زوتوپ‌های کاربردی Cu گسی‌لنده β^+

فوتون نابودی (%)	γ (KeV)(%)	EC (%)	β^+ (MeV)(%)	β^- (MeV)(%)	نیمه‌عمر	رادی‌وای‌زوتوپ
	3124/1 (4/8)		(49)			
	(3/34)		1/9805			
	2158/9		(15)			
	1861/6 (4/8)		2/9456			
	(45/4)		(11/6)			
185/19	1791/6	12/01	1/9105	---	23/7 m	^{60}Cu
	1332/5 (88)		3/7719 (5)			
	1035/2 (3/7)		(4/59)			
	826/4 (21/7)		1/8352			
	467/3 (3/52)		(2/8)			
			2/4784			
	(10/77)		(51)			
	656/01		1/2164			
	(2/10)		(2/3)			
120/87	373/05	38/6	1/89/14	---	3/33 h	^{61}Cu
	(12/2)		(5/5)			
	282/956		0/9334			
	(4/20)		(2/6)			
	67/412		0/5604			
194/86	(0/342)	2/8	(97/2)	---	9/74 m	^{62}Cu
	1173/02		2/927			
34/79	(0/473)	43/6	(17/4)	(39)	12/7 h	^{64}Cu
	1345/77		0/6531	0/5787		

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نی‌کل، کبالت، روی و خود مس

تا به امروز روش‌های مختلفی برای تول‌ید ^{61}Cu ارائه شده که تقریباً تمام این روش‌ها در جدول 2 آورده

اصلی‌ترین هدف‌های مورد استفاده برای تولید این رادیوایزوتوپ هستند.

جدول (2): روش‌های مختلفی تولید رادیوایزوتوپ ^{61}Cu

واکنش	سال	رفرنس
$^{62}\text{Ni}(p,2n)^{61}\text{Cu}$	1955	(5) Cohen and Newman
$^{58}\text{Ni}(\alpha,n)^{61}\text{Zn}$ ^{61}Cu	1959	(6) Cumming
$^{64}\text{Zn}(d,\alpha)^{61}\text{Cu}$	1963	(7) Williams and Irvine
$^{59}\text{Co}(^3\text{He},n)^{61}\text{Cu}$ $^{63}\text{Cu}(^3\text{He},an)^{61}\text{Cu}$	1963	(8) Bryant et al.
$^{61}\text{Ni}(d,2n)^{61}\text{Cu}$ $^{60}\text{Ni}(d,n)^{61}\text{Cu}$	1967	(9) Cogneau et al.
$^{63}\text{Cu}(p,t)^{61}\text{Cu}$ $^{65}\text{Cu}(p,t2n)^{61}\text{Cu}$	1967	(10) Williams and Fulmer
$^{63}\text{Cu}(d,d2n)^{61}\text{Cu}$	1970	(11) Fulmer and Williams
$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$	1972	(12) Tanaka et al.
$^{59}\text{Co}(\alpha,2n)^{61}\text{Cu}$	1976	(13) Homma and Murakami
$^{58}\text{Ni}(\alpha,p)^{61}\text{Cu}$	1978	(14) Muramatsu et al.
$^{nat}\text{Ni}(d,xn)^{61}\text{Cu}$	1998	(15) Tolmachev et al.
$^{nat}\text{Cu}(\alpha,x)^{61}\text{Cu}$	2002	(16) Szelecsenyi et al.
$^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$	1954	(17) Cohen et al.

انرژی پروتون $7/7 \text{ MeV}$ تا $29/5 \text{ MeV}$ مجدداً بررسی کرد و به نتایج مشابه با نتایج Cohen و همکارانش دست یافت (18). Gyürky و همکارانش در یک بررسی تجربی در سال 2014 مطالعه مشابهی را در بازه انرژی پروتون $4/4 \text{ MeV}$ تا $8/8 \text{ MeV}$ بر روی واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ انجام دادند که نتایج آنها در این محدوده انرژی، نتایج دو مطالعه قبلی را تأیید می‌کند (19). به دلیل قیمت بالای هدف‌های غنی شده، اکثر محققان سعی می‌کنند از هدف‌های عنصری خالص استفاده کنند. هدف عنصری خالص ترکیبی از ایزوتوپ‌های پایدار آن عنصر است. استفاده از هدف عنصری خالص در کنار ارزان بودن، موجب افزایش ناخالصی‌های رادیوایزوتوپی، کاهش

امروزه مراکز تولید کننده رادیوایزوتوپ‌های مصنوعی، بسته به امکانات در دسترس، عمدتاً از یکی از پنج روش $^{61}\text{Ni}(p,n)$ ، $^{59}\text{Co}(\alpha,2n)$ ، $^{58}\text{Ni}(\alpha,p)$ ، $^{60}\text{Ni}(d,n)$ و $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)$ برای تولید رادیوایزوتوپ ^{61}Cu استفاده می‌کنند که در این بین دو واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ به دلیل سطح مقطع تولید بالا در انرژی‌های پایین و استفاده از باریکه پروتون (p)، بیشتر مورد توجه مراکز سیکلوترون (تا 20 MeV) بی‌مارستانی هستند. Cohen و همکارانش در سال 1954 سطح مقطع واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ را در بازه انرژی پروتون $7/1 \text{ MeV}$ تا $23/5 \text{ MeV}$ به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند (17). در سال 1991، Levkovski سطح مقطع این واکنش را در بازه

پایین موجب کاهش شدیدی سطح مقطع و در نتیجه بهره تولیدی مس-61 از طریق واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ می‌شود. مطالعات تجربی بسیاری بر روی واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ انجام شده است که این واقعات را نشان می‌دهند (شکل 10). در این مطالعه با استفاده از کدهای هسته‌ای TALYS، EMPIRE و MCNPX، سطح مقطع و بهره تولیدی دو واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ و $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ در حضور هدف‌های غنی شده ^{61}Ni ، ^{64}Zn و هدف‌های عنصری خالص نیکل و روی، مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج تجربی مقایسه شد.

مواد و روش کار

در این مطالعه مداخله‌ای برای انتخاب واکنش مناسب و پارامترهای بهینه تولیدی، ابتدا توابع برانگیختگی دو واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ و $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ برای اهدافی از جنس ایزوتوپ غنی‌شده و عنصر طبیعی خالص با استفاده از کدهای هسته‌ای EMPIRE و TALYS و در بازه انرژی 0 تا 40 MeV، محاسبه و ترسیم می‌شود. از توابع برانگیختگی به دست آمده، بهترین انرژی باریکه فرودی تعیین شده و با استفاده از کد مونت‌کارلو SRIM، توان ایستادن‌گی و برد ذرات باریکه فرودی برای برآورد بهترین ضخامت ماده هدف، محاسبه می‌شود. با انتگرال‌گیری معین از فرمول بهره تولیدی در محیط نرم افزار MATLAB، بهره تولیدی ^{61}Cu در هر واکنش به دست می‌آید. علاوه بر این با استفاده از کد مونت‌کارلو MCNPX، محاسبات بهره تولیدی مجدداً انجام شده و نتایج حاصل از این دو شبیه‌سازی با نتایج تجربی مورد قبول پایگاه داده‌های هسته‌ای EXFOR مقایسه می‌شود.

سطح مقطع تولیدی و در نتیجه کاهش بهره تولیدی می‌شود. Uddin و همکارانش در سال 2007 با استفاده از هدف عنصری خالص، واکنش $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ را در بازه انرژی پروتون 4 MeV تا 39/6 MeV به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. با وجود تغییر ناچیز محدوده انرژی تولیدی رادیوایزوتوپ ^{61}Cu تحت واکنش $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ نسبت به واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ ؛ سطح مقطع و بهره تولیدی ^{61}Cu تحت این واکنش تقریباً نصف شده است (20). آزمایش تجربی Asad و همکارانش در سال 2014 تا حد زیادی نتایج آزمایش Uddin و همکارانش را تأیید می‌کند (21).

در یکی از اولین مطالعات بر روی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ ، Tanaka و همکارانش در سال 1972 هدف غنی شده‌ای از ^{61}Ni را با پروتون‌هایی در بازه انرژی 2/7 MeV تا 13/9 MeV پرتوده‌ی کردند. حداکثر سطح مقطع واکنش بررسی شده توسط آن‌ها در انرژی 9 MeV و برابر با 476 mbarn بود (12). در مطالعه مشابهی که در سال 1993 توسط Szelecsenyi و همکارانش بر روی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ در بازه انرژی پروتون 3/5 MeV تا 18/6 MeV انجام شد، حداکثر سطح مقطع واکنش در انرژی 10/3 MeV و برابر با 508 mbarn بود (22). در مطالعه Singh و همکارانش در سال 2006، حداکثر سطح مقطع 407 mbarn در انرژی 10/65 MeV به دست آمد (23). در سال 2014 Aslam و Qaim نیز واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ را در بازه انرژی 3/5 MeV تا 30 MeV انجام دادند که نتیجه آن حداکثر سطح مقطع 504 mbarn در انرژی 10 MeV بود (24). عنصر نیکل خالص تنها 1/14 درصد از ایزوتوپ پایدار ^{61}Ni را در خود دارد و این درصد بسیار

کد TALYS:

کد TALYS یک برنامه کامپیوتری است که می‌تواند سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای را بر اساس مدل‌های مختلف هسته‌ای همچون مدل اپتیکی، مدل گاز فرمی، مدل گاز فرمی پس‌رانده، مدل گیلبرت و کامرون، مدل ابرشار تعمیم یافته و مدل‌های آماری میکروسکوپی، محاسبه کند. این کد در طی همکاری دو مرکز تحقیقاتی در فرانسه و هلند توسط کونینگ¹ و همکارانش با زبان فرترن نوشته شده و برای سیستم عامل لینوکس و یونیکس طراحی شده است. در حالت پایه، فایل ورودی کد TALYS حداقل به چهار داده: 1. نوع ذره پرتابه؛ 2. عنصر هدف؛ 3. عدد جرمی عنصر هدف؛ و 4. انرژی اولیه پرتابه؛ نیاز دارد. این کد قادر است سطح مقطع کل تولید یک رادیوایزوتوپ را از طریق کانال‌های مختلف محاسبه کند. در این کد می‌توان واکنش‌های هسته‌ای با پرتابه n ، p ، d ، t ، γ ، $^3\text{He}^+$ و α در محدوده انرژی 0/001 MeV تا 200 MeV را شبیه‌سازی کرد. محاسبات انجام شده در این مطالعه با استفاده از آخرین نسخه کد TALYS یعنی نسخه 1/96 (2021) انجام می‌شود.

کد EMPIRE:

کد EMPIRE یک سیستم پیمان‌های از کدهای هسته‌ای شامل مدل‌های هسته‌ای متعددی از جمله مدل اپتیکی، واکنش مستقیم، مدل هسته مرکب، شبیه‌سازی مونت‌کارلو هببریدی (DDHMS)، دستور چندمرحله‌ای (ORION+TRISTAN)، کانال‌های جفت شده و (ESIS06) DWBA و (OPTMAN)، مدل اکسیتون (PCROSS)،

ترکیب چندمرحله‌ای (NVWY) و نسخه کامل مدل‌ها وزر- فشباخ² است که در سال 1980 برای بررسی واکنش‌های هسته‌ای و ن‌یز ارزیابی داده‌های هسته‌ای در بازه وسیعی از انرژی‌ها و ذرات فرودی طراحی شده است. در این کد طیف وسیعی از ذرات از جمله فوتون، نوکلئون‌ها، d ، t ، $^3\text{He}^+$ ، α و یون‌های سبک و سنگین را می‌توان به‌عنوان پرتابه مورد بررسی قرار داد. محدوده انرژی مورد ارزیابی در این کد از اندکی بالاتر از ناحیه تشدید برای پرتابه n شروع شده و تا چند صد MeV برای واکنش‌های القایی با یون‌های سنگین ادامه می‌یابد. آخرین نسخه این کد که در سال 2021 منتشر شده، Empire-3-2-2zv2 است که در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کد مونت‌کارلو MCNPX:

کد مونت‌کارلو MCNP برای اولین بار در سال 1963 در آزمایشگاه لوس آلاموس تحت عنوان MCS تهیه شده و در سال 1977 برای اولین بار با نام MCNP ارائه شد و در ادامه نسخه‌های 4A و 4B، که تنها ذرات n و فوتون را در نظر می‌گرفت، ارائه شد. در سال 2000، ذره e^- به نسخه‌های قبلی اضافه شد و با نام MCNP4C عرضه شد. بعد از آن نسخه‌های X، 5 و 6 ارائه شد که هر کدام قابل‌تجاهی فراوانی دارند. یکی از تفاوت‌های اساسی نسخه X به‌بالا نسبت به نسخه 4C و قبل از آن، پوشش طیف وسیعی از ذرات پرتابه است؛ به‌طوری‌که نسخه 4C تنها 3 ذره فوتون، n و e^- را پوشش می‌دهد، اما در نسخه X به‌بالا می‌توان حداقل 35 نوع ذره مختلف را به‌عنوان پرتابه

². Hauser-Feshbach model

¹. Koning

SRIM-2013 برای محاسبه میزان افت انرژی و برد پرتابه در هدف های مختلف استفاده شده است.

انتخاب کرد. برای استفاده از این کد باید یک فایل ورودی با ساختار مشخص شامل اطلاعات مسئله همچون هندسه، مواد، چشمه، نوع خروجی و ... تهیه شود. کد با در نظر گرفتن اطلاعات ورودی و استفاده از کتابخانه سطح مقطع ها، مسئله را حل و نتایج را در یک یا چند فایل خروجی تولید می کند. این کد علاوه بر محیط لاینوکس، در محیط ویندوز نیز قابل اجرا است. در این مطالعه برای انجام محاسبات از نسخه X2/6 این کد که در سال 2008 ارائه شده، استفاده می شود.

کد مونتکارلو SRIM:

کد SRIM یک کد شبیه سازی مونتکارلو برای بررسی نفوذ یونها در ماده است که در سال 1985 توسط زیگلر¹ و همکارانش بر اساس تئوری LSS نوشته شده و تاکنون چندین بار اصلاح شده است. این کد به حل معادله توان ایستاندگی (معادله 1) با استفاده از رفتار کوانتوم ی بر خورد یون- اتم پرداخته و توان ایستاندگی جرمی $\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)$ هدف و همچنین برد ذره پرتابه (معادله 2) در بازه انرژی انتخابی را محاسبه می کند. محدوده انرژی ذرات در این کد بین 10 eV تا 2 GeV بر واحد جرم اتمی (amu) است. در ورودی کد SRIM باید داده هایی همچون نوع ذره پرتابه، نوع هسته هدف، بازه انرژی ذره پرتابه و چگالی هدف وارد شود. محاسبات انجام شده توسط این کد، دقت قابل قبولی دارند و می توان با اطمینان از آن در برآورد ضخامت هدف در تولید رادیوایزوتوپها، استفاده کرد. در این مطالعه از نسخه

¹. Ziegler

$$\frac{dE}{dx} = \sigma \frac{4\pi e^4 z^2 \rho N_A Z}{R} = \int_{E_E} \left(-\frac{dE}{dx} \right) v^2 M dE$$

که در آن E_E انرژی اولیه ذره پرتابه است.

رابطه پرتوزایی محصول و بهره تولید آن:

اگر لایه نازکی از یک ماده هدف به مدت مشخصی در معرض تابش باریکه‌ای از ذرات باردار قرار گیرد، پرتوزایی رادیوایزوتوپ تولید شده برحسب MBq برابر است با

$$A(t) = 3$$

جرمی هدف برحسب $\frac{MeV.cm^2}{mgr}$ است و در نهایت، E_I و E_E (برحسب MeV) به ترتیب انرژی ابتدایی و انتهایی ذره فرودی در حین عبور از لایه هدف است. بهره تولید یک واکنش هسته‌ای به صورت نسبت تعداد هسته‌های تولید شده در پایان واکنش به تعداد ذرات پرتابه به صورت بار کل باریکه ذرات (برحسب کولن (C) و یا $\mu A.h$) به دست می‌آید.

که در آن I شدت جریان باریکه فرودی برحسب μA ؛ f درصد فراوانی ماده هدف؛ M جرم مولی ماده هدف برحسب $\frac{g}{mol}$ ؛ λ ثابت واپاشی محصول برحسب h^{-1} ؛ t مدت زمان بمباران هدف برحسب h ؛ $\sigma(E)$ تابع برانگیختگی ماده هدف (برحسب mbarn) برای تولید رادیوایزوتوپ مورد نظر است که از کدهای هسته‌ای TALYS و EMPIRE به دست می‌آید؛ $S_T(E)$ توان ایستانندگی

تابع برانگیختگی واکنش $^{64}Zn(p,\alpha)^{61}Cu$

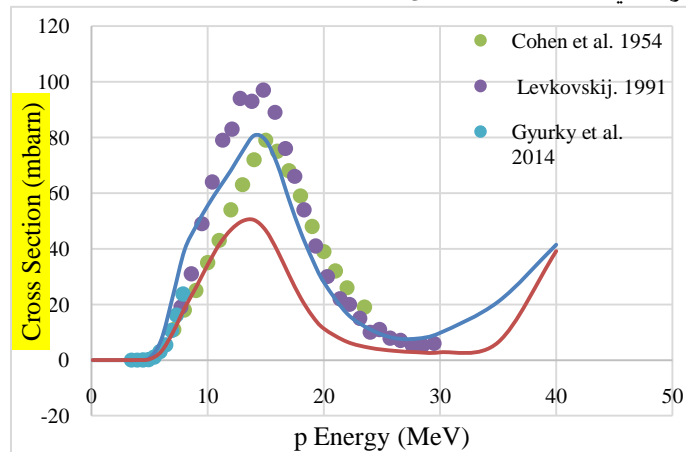
همان طور که در شکل 1 قابل مشاهده است، تابع‌های برانگیختگی تولید شده توسط کدهای TALYS و EMPIRE برای واکنش $^{64}Zn(p,\alpha)^{61}Cu$ دارای شکل و ارتفاع تقریباً یکسانی هستند؛ به طوری که اختلاف ارتفاع این دو تابع در حد 30 mbarn است. قله تابع برای کدهای TALYS و EMPIRE در انرژی 14 MeV قرار دارد و مقدار آن به ترتیب برابر با 50/266 mbarn و 80/66 mbarn است. از شکل 2 می‌توان دید که ^{63}Cu و ^{60}Cu دو ناخالصی عمده تولید شده در بازه انرژی 0 MeV تا 20 MeV است که ایزوتوپ ^{63}Cu به دلیل پایدار بودن، ناخالصی پرتویی ایجاد نمی‌کند و تنها مشکل حضور آن در

که در آن Y_{EOB} بهره تولیدی رادیوایزوتوپ مورد نظر برحسب $\frac{MBq}{\mu A}$ است. در صورتی که مدت زمان پرتوده‌ای 1 ساعت باشد، می‌توان بهره تولیدی محصول در پایان بمباران را برحسب یکای مرسوم $\frac{MBq}{\mu A.h}$ نیز بیان کرد.

یافته‌ها

در این مطالعه مداخله‌ای ابتدا تابع برانگیختگی واکنش‌های هسته‌ای $^{64}Zn(p,\alpha)^{61}Cu$ ، $^{nat}Zn(p,x)^{61}Cu$ ، $^{61}Ni(p,n)^{61}Cu$ و $^{nat}Ni(p,x)^{61}Cu$ با استفاده از کدهای هسته‌ای EMPIRE و TALYS و در بازه انرژی 0 تا 40 MeV، مطابق شکل‌های 1 تا 10 محاسبه و ترسیم شده و با داده‌های تجربی مقایسه شد.

محصول نهایی، کاهش پرتوزایی و یژه است. رادیوایزوتوپ ^{60}Cu را نی می توان با انتخاب انرژی باریکه فرودی مناسب، تا حد زیادی حذف کرد. بر اساس شکل های 2 و 3 بهترین بازه انرژی برای باریکه فرودی برای پرتودهی هدفی از جنس ^{64}Zn غنی شده، محدوده 7 MeV تا 15 MeV است تا ^{60}Cu تولدی نشود و تولدی حداقل ^{63}Cu

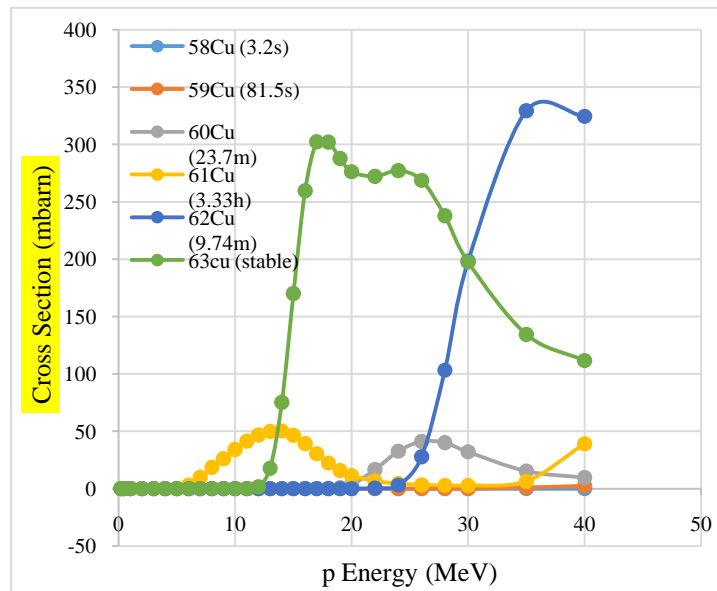


مقدار باشد.

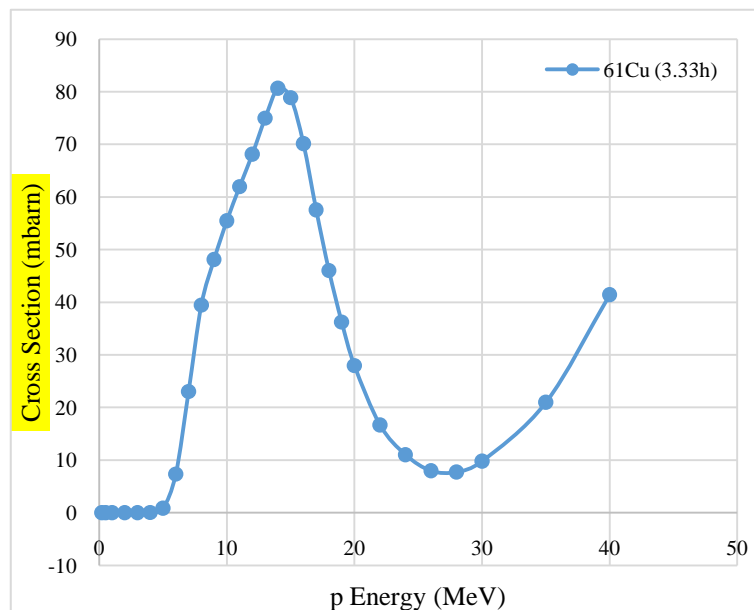
شکل 3 مقایسه ای بین نتایج شبیه سازی و آزمایش های تجربی تولدی ^{60}Cu از طریق واکنش $^{61}\text{Zn}(p, \alpha)$ است. همان طور که قابل مشاهده است، داده های تجربی به لحاظ قله تابع و محدوده انرژی در توافق خوب ی با نتایج شبیه سازی، مخصوصاً داده های کد شبیه سازی EMPIRE، هستند (17-19). در کدهای TALYS و EMPIRE برای به دست آوردن داده هایی دقیق و مشابه نتایج تجربی از مدل چگال ی سطح می کروسکوپی HFB¹ استفاده شده است که به وضوح می توان آن را در شکل 1 دید.

¹. Hartree-Fock-Bogoliubov

شکل (1): مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کدهای EMPIRE و TALYS با داده‌های تجربی



شکل (2): تابع برانگیختگی واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد TALYS



شکل (3): تابع برانگیختگی واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد EMPIRE

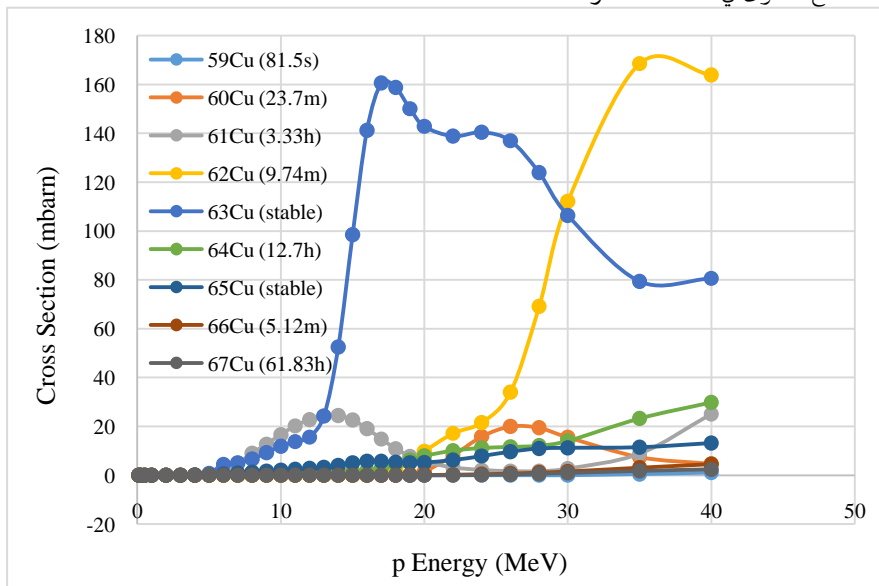
انرژی‌های مختلف به هر یک از این ایزوتوپ‌ها، با احتمال‌های متفاوتی منجر به تولید طیف وسیعی از رادیوایزوتوپ‌ها می‌شود. در شکل 4 تابع برانگیختگی رادیوایزوتوپ‌های مس در واکنش $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ در بازه

تابع برانگیختگی واکنش $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$:

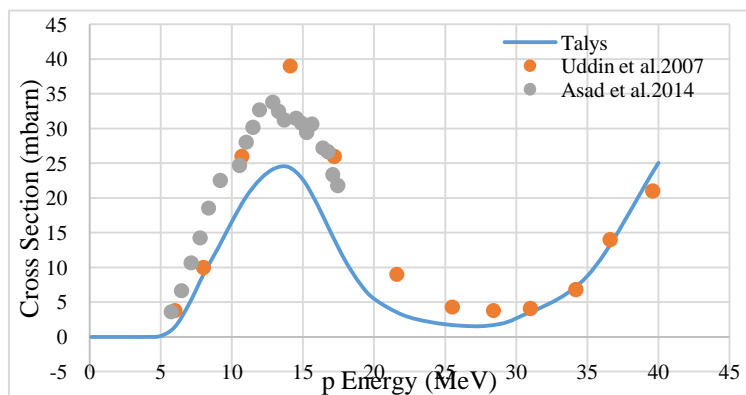
عنصر روی خالص ترکیبی از 4 ایزوتوپ پایدار ^{64}Zn ، ^{66}Zn ، ^{67}Zn و ^{68}Zn با درصد فراوانی به ترتیب 48/6 درصد، 27/9 درصد، 4/1 درصد و 18/8 درصد است. برخورد بار یکه p با

به نصف کاهش یافته است؛ اما محدوده انرژی آن تغییری محسوس نکرده است. ناخالصی عمده در محدوده انرژی MeV 7 تا 15 MeV، ایزوتوپ ^{63}Cu است که پایدار بوده و نگرانی پرتویی ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این، داده‌های تجربی نشان داده شده در شکل 5، تا حدودی با نتایج شبیه‌سازی در توافق هستند (20، 21).

انرژی 0 تا 40 MeV نشان داده شده است. احتمال تولید رادیوایزوتوپ‌های این خانواده خیلی پایین است؛ از این رو در این شکل ذکر نشده اند. در شکل 5 نیز مقایسه ای بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای تولید ^{61}Cu از ^{nat}Zn به نمایش گذاشته شده است. از شکل 4 می‌توان این نتیجه را گرفت که سطح مقطع تولید ^{61}Cu از ^{nat}Zn



شکل (4): تابع برانگیختگی واکنش $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد TALYS



شکل (5): مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد TALYS با داده‌های تجربی

تا 40 MeV به ترتیب در شکل‌های 6 و 7، و مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی تولید ^{61}Cu با نتایج تجربی در شکل 8 به نمایش گذاشته شده است. تابع

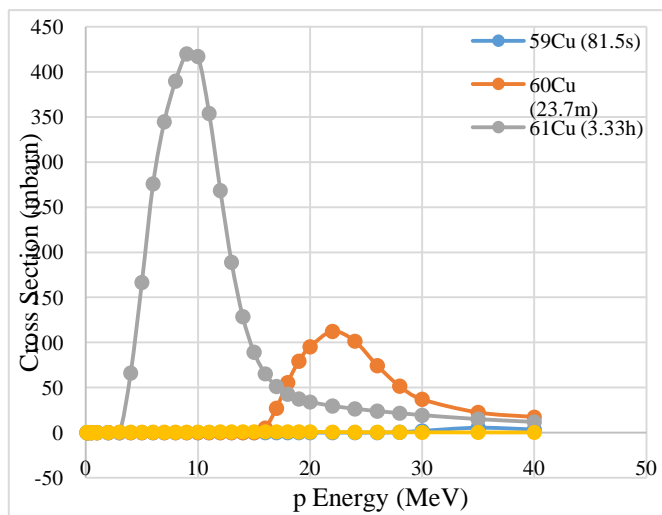
تابع برانگیختگی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$:

تابع برانگیختگی شبیه‌سازی شده واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ توسط کدهای هسته‌ای TALYS و EMPIRE در محدوده انرژی 0

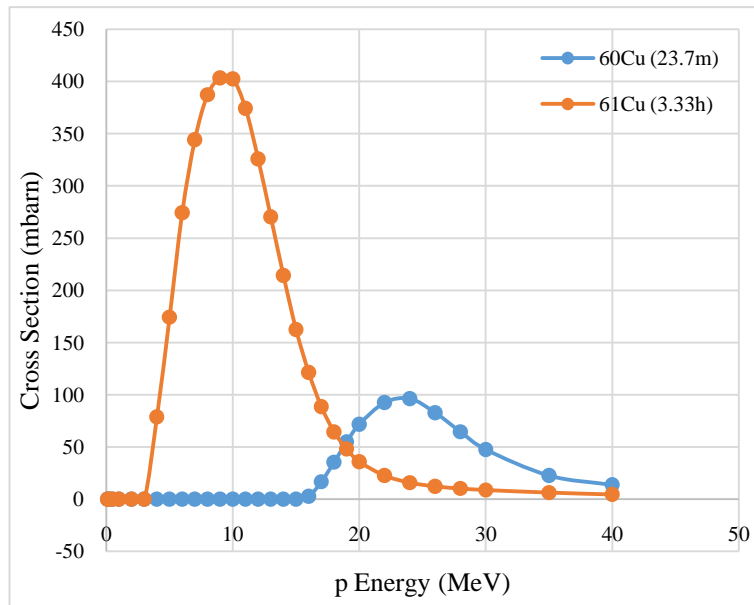
رادیوایزوتوپ ^{59}Cu و ^{60}Cu نی ز در مقادیر ناچیزی تولید شوند که چون نیمه‌عمر هر سه آن‌ها کمتر از ^{61}Cu است، با سردسازی مناسب می‌توان آن‌ها را تا حد زیادی حذف کرد. در نتیجه مناسبترین بازه انرژی برای باریکه p ، محدوده 5 MeV تا 15 MeV، و بهترین انرژی نیز 9 MeV است. با مشاهده شکل 8 که مقایسه‌ای بین داده‌های تجربی مربوط به واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد، می‌توان به وضوح توافق این دو دسته از داده‌ها را دید. داده‌های تجربی به‌جز در قله تابع برانگیختگی، در تمام نقاط بر نمودار TALYS و EMPIRE منطبق هستند. با این حال، انرژی قله تابع برانگیختگی حاصل از داده‌های تجربی نیز در انرژی 9 MeV قرار دارد (12, 22-26).

برانگیختگی تولید ^{61}Cu شبیه‌سازی شده توسط کدهای TALYS و EMPIRE در محدوده انرژی 0 تا 8 MeV کاملاً بر هم منطبق هستند، قله هر دو تابع با اختلاف 16 mbarn در انرژی 9 MeV قرار دارد و از انرژی 10 MeV به بعد، اختلاف ناچیزی دارند؛ به طوری که می‌توان گفت که نتیجه شبیه‌سازی هر دو کد تقریباً با هم یکسان هستند. مدل چگالی سطحی میکروسکوپ HFB، مدل هسته‌ای است که در این شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

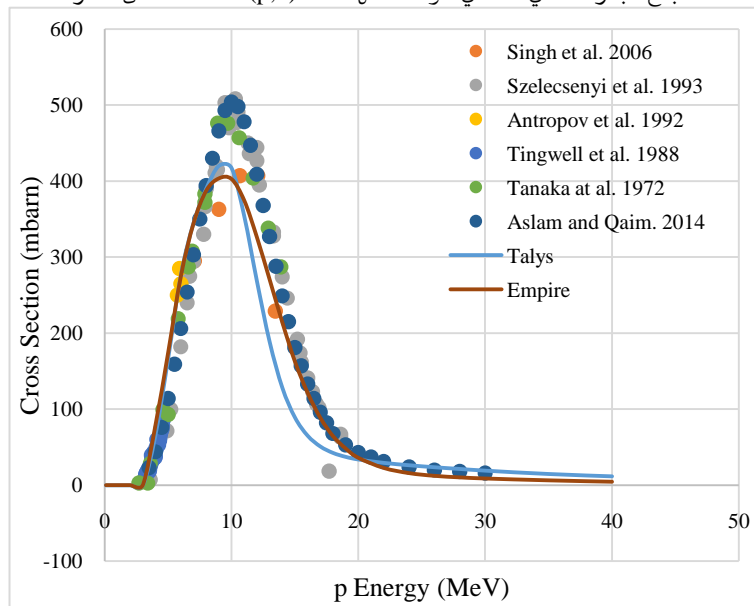
در این واکنش مهم‌ترین ناخالصی تولید شده، رادیوایزوتوپ ^{60}Cu است که انرژی آستانه تولید آن بر اساس نتایج هر دو کد در شکل‌های 6 و 7، 16 MeV است؛ از این رو با انتخاب بازه انرژی مناسب تا 15 MeV، می‌توان از تولید این رادیوایزوتوپ جلوگیری کرد. علاوه بر ^{60}Cu ، دو



شکل (6): تابع برانگیختگی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد TALYS



شکل (7): تابع برانگیختگی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد EMPIRE



شکل (8): مقایسه تابع برانگیختگی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کدهای EMPIRE و TALYS با داده‌های تجربی

$^{60}\text{Ni}(p,\gamma)$ ، $^{61}\text{Ni}(p,n)$ ، $^{62}\text{Ni}(p,2n)$ و $^{64}\text{Ni}(p,4n)$ می‌تواند منجر به تولید ^{61}Cu شود. بزرگترین رادیوایزوتوپ که از برخورد بار یکه p با ^{58}Ni تولید می‌شود، ^{69}Cu است و عملاً تحت این برهمکنش، ^{61}Cu تولید نمی‌شود. علاوه بر این، احتمال تولید ^{61}Cu از طریق واکنش $^{60}\text{Ni}(p,\gamma)$ نیز بسیار پایین است. در نتیجه حدود 94 درصد از نیکل

تابع برانگیختگی واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$:

عنصر نیکل خالص ترک یب ی از 5 ایزوتوپ پایدار ^{58}Ni ، ^{60}Ni ، ^{61}Ni ، ^{62}Ni و ^{64}Ni با درصد فراوانی به ترتیب 68/077 درصد، 26/223 درصد، 1/14 درصد، 3/634 درصد و 0/926 درصد است. هنگامی که باریکه‌ای از p با انرژی‌های مختلف به عنصر نیکل خالص برخورد می‌کند، تحت واکنش‌های

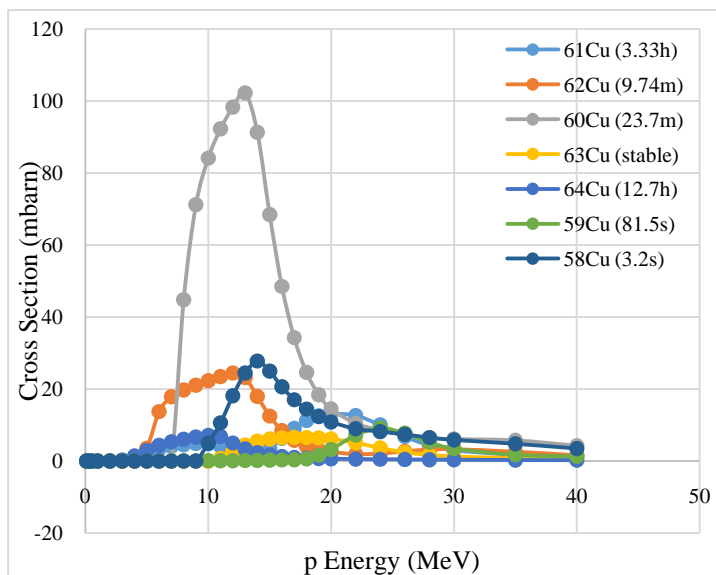
خوبی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد (29-31).

محاسبه ضخامت هدف و بهره واکنش:

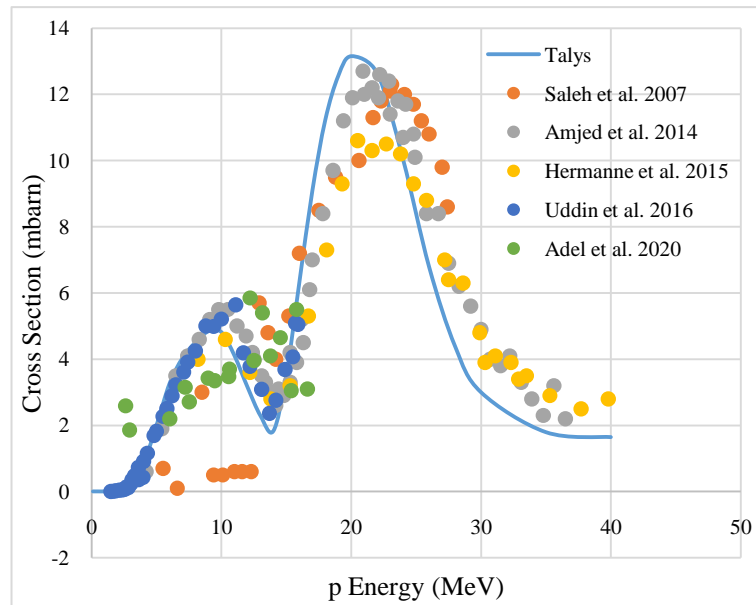
با استفاده از کد مونت کارلو SRIM، برد ذرات p (ضخامت هدف) و توان ایستاندگی جرمی آنها در هدف‌هایی از جنس ^{61}Ni ، ^{64}Zn و ^{nat}Zn در بازه انرژی 0 تا 40 MeV شبیه‌سازی شد. با استفاده از نرم افزار متلب، معادله تابع برانگیختگی $\sigma(E)$ واکنش‌ها هسته‌ای $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ ، $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{nat}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ و معادله توان ایستاندگی جرمی $S_T(E)$ آنها در بازه انرژی 0 تا 40 MeV به دست آمد. با انتگرال‌گیری عددی از فرمول 4 در بازه انرژی 0 تا انرژی قله تابع برانگیختگی، حداکثر بهره تولید به دست می‌آید. داده‌های مربوط به محاسبه حداکثر برد پرتو و حداکثر بهره واکنش در جدول 3 نشان داده شده است.

طبیعی تحت واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ عملاً کاربرد ندارد. این واقعیت را می‌توان در شکل 9 به وضوح مشاهده کرد. در حالی که برای واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ ، حداکثر سطح مقطع mbarn 419 است و ناخالصی محدودی وجود دارد که با انتخاب بازه انرژی مناسب و سردسازی می‌توان آن‌ها را حذف کرد؛ برای واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ ، حداکثر سطح مقطع به سختی به 13 مبرسد و حجم ناخالصی به حدی زیاد است که عملاً استفاده از آن واکنش برای تولید ^{61}Cu را با چالش جدی روبه‌رو می‌کند.

تعدادی از جدی‌ترین داده‌های تجربی مربوط به واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ تابع برانگیختگی حاصل از کد TALYS برای این واکنش، در شکل 10 قابل مشاهده است. به جز داده‌های حاصل از آزمایش Al-Saleh و همکارانش (2007) (27) و Adel و همکارانش (2020) (28)، سایر داده‌ها در محدوده انرژی مورد بررسی توسط محققان، تا حد زیادی بر داده‌های حاصل از شبیه‌سازی



منطبق هستند و می‌توان گفت که توافق شکل (9): تابع برانگیختگی واکنش $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد TALYS



شکل (10): مقایسه تابع برانگیختگی واکنش ${}^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x){}^{61}\text{Cu}$ حاصل از کد TALYS با داده‌های تجربی

جدول (3): حداکثر برد پرتو و حداکثر بهره تولید برای پرتودهی عمودی هدف توسط باریکه فرودی

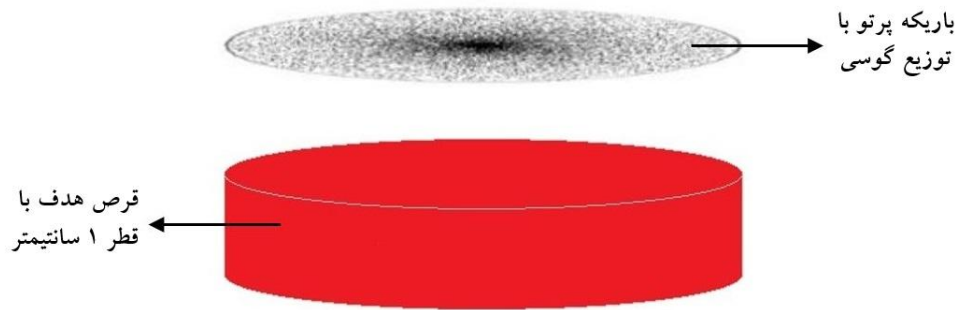
واکنش هسته‌ای	انرژی باریکه (MeV)	حداکثر برد پرتو در هدف (μm)	حداکثر بهره تولید TALYS ($\text{MBq}/\mu\text{Ah}$)	حداکثر بهره تولید EMPIRE ($\text{MBq}/\mu\text{Ah}$)
${}^{64}\text{Zn}(p,\alpha){}^{61}\text{Cu}$	14	529/09	113/29	183/24
${}^{\text{nat}}\text{Zn}(p,x){}^{61}\text{Cu}$	14	541/18	55/07	----
${}^{61}\text{Ni}(p,n){}^{61}\text{Cu}$	9	202/3	498/51	497/21
${}^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x){}^{61}\text{Cu}$	20	760/1	46/51	----

هدف برخورد می‌کند؛ اما چون در کد MCNPX-2/6 امکان شبیه‌سازی باریکه خروجی سیکلوترون وجود ندارد، باریکه به صورت یک چشمه پرتو به شکل دایروی با توزیع فضایی گاوسی با FWHM برابر با 4 mm و واگرایی برابر با 17/4 mrad و توزیع انرژی گاوسی با FWHM برابر با 300 KeV که در فاصله 0/1 cm از هدف قرار دارد، با استفاده از کارت sdef شبیه‌سازی شد. از مدل فیزیکی ISABEL/ABLA در محاسبات استفاده شد؛ چون با استفاده از این مدل، کمترین اختلاف بین نتایج محاسباتی و داده‌های تجربی به دست می‌آید (32).

محاسبه بهره واکنش با MXNPX:

از آنجایی که دو واکنش ${}^{64}\text{Zn}(p,\alpha){}^{61}\text{Cu}$ و ${}^{61}\text{Ni}(p,n){}^{61}\text{Cu}$ در انرژی سطح مقطع حداکثر خود، بهره تولید ${}^{61}\text{Cu}$ بالاتری دارند؛ محاسبات بهره تولید با استفاده از کد MCNPX-2/6 فقط برای این دو واکنش انجام شد.

برای شبیه‌سازی این دو واکنش، هدف قرصی شکل به قطر 1 cm و با ضخامتی برابر با برد باریکه فرودی در هدف، مطابق با ابعاد واقعی سیستم هدف سیکلوترون طراحی شد. باریکه فرودی به صورت عمود بر هدف می‌تابد. باریکه پرتو در واقع یکی از باریکه پرتوهای خروجی از شتابدهنده سیکلوترون است که به صورت پالسی به



شکل (11): شماتیکی از سیستم هدف و باریکه فرودی طراحی شده برای فایل ورودی MCNPX

آوردن $P(E)$ ، به یک نرمالیزه می‌شود. برای کاهش انحراف معیاری از نتایج، محاسبات برای 10 میلیون ذره تکرار شد. برای محاسبه بهره، محاسبات از طریق فرمول انتگرالی زیر انجام می‌شود.

برای محاسبه بهره تولید حاصل از شبیه‌سازی MCNPX، تابع توزیع انرژی ذرات فرودی در محیط هدف با کارت تالی F4/E4 که متوسط شار ذره در واحد حجم سلول ($\text{particle}/\text{cm}^3$) را حساب می‌کند، به دست می‌آید. سپس این تابع توزیع انرژی ذرات برای به دست

$$Y_{EOB} \left(\frac{\text{MBq}}{\mu\text{Ah}} \right) = 3.76 \times$$

تولید ^{61}Cu که از کد هسته ای TALYS گرفته می‌شود؛ $P(E)$ ، تابع توزیع ذرات برحسب انرژی است و در نهایت، E_E و E_I (برحسب MeV) به ترتیب انرژی ابتدایی و انتهای ذره فرودی در حین عبور از لایه هدف به ضخامت x است.

که در آن ρ ، چگالی ماده هدف برحسب $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ ؛ d ، ضخامت ماده هدف برحسب cm؛ f ، درصد فراوانی ماده هدف؛ M ، جرم مولی ماده هدف برحسب $\frac{\text{gr}}{\text{mol}}$ ؛ λ ، ثابت واپاشی محصول برحسب h^{-1} ؛ t ، مدت‌زمان بمباران هدف برحسب h؛ $\sigma(E)$ ، تابع برانگیختگی ماده هدف برای

جدول (4): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ با نتایج تجربی

نتایج تجربی* (MBq/ μ Ah)	بهره تولید MCNPX (MBq/ μ Ah)	بهره تولید TALYS (MBq/ μ Ah)	ضخامت هدف (μm)	انرژی باریکه (MeV)	واکنش
(33) 155	90/73	113/29	529/09	14	$^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$
(33) 461/32	470/26	498/51	202/3	9	$^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$

*نتایج تجربی ارائه شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (آپدیت 2019)

تقریباً با هم در توافق هستند؛ اما این نتایج اختلاف زیادی با نتایج کد EMPIRE و آزمایش‌های تجربی دارند که می‌توان این واقعیت را از اختلاف زیاده در بین تابع برانگیختگی شبیه‌سازی شده و تجربی در شکل 3 نیز

از داده‌های ارائه شده در جدول‌های 3 و 4 می‌توان به این نتیجه رسید که بهره تولید ^{61}Cu شبیه‌سازی شده توسط کدهای MCNPX و TALYS برای واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ ، اختلاف کم با هم دارند و می‌توان گفت که

داده‌های کد TALYS در انرژی 14 MeV برابر با 55/07 MBq/μAh است؛ حال آنکه در مطالعه Uddin و همکارانش (2007) و Asad و همکارانش (2014) بهره تجربی به دست آمده در انرژی 14 MeV در محدوده 90 MBq/μAh تا 95 MBq/μAh است (20، 21). دودلی اصلی اختلاف زیاد بین بهره تجربی و بهره محاسبه شده در این مطالعه عبارتند از: اولاً، هیچ مدل هسته‌ای نمی‌تواند به‌طور کامل اتفاقات واقعی رخ داده در واکنش‌ها هسته‌ای را بیان کند. دوماً، در محاسبات تئوری مدت‌زمان پرتوده‌ای و شدت جریان ب‌م خروجی 1 در نظر گرفته می‌شود؛ اما در کارهای تجربی هم‌یشه بیشتر از 1 هستند و پرتوزایی به دست آمده بر این عدد تقسیم می‌شود که معمولاً عدد حاصل بزرگتر از زمانی است که مخرج 1 باشد.

بهره واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ برای کدهای TALYS و EMPIRE در انرژی 9 MeV به ترتیب برابر با 498/51 MBq/μAh و 497/21 MBq/μAh و داده تجربی ارائه شده توسط IAEA برابر با 461/32 MBq/μAh است (34). مطالعه Aslam و Qaim (2014) بر روی این واکنش نشان داد که در این انرژی، بهره‌ای تجربی در حدود 550 MBq/μAh نیز قابل دستیابی است (24). داده‌های حاصل از شبیه‌سازی واکنش $^{61}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ توسط کد TALYS در انرژی 20 MeV، بهره‌ای برابر با 46/51 MBq/μAh به دست می‌دهد که کمترین بهره محاسباتی در بیشترین انرژی ممکن است. Amjed و همکارانش (2014) در این انرژی، بهره تجربی 45 MBq/μAh را برای واکنش $^{61}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ به دست آوردند که با بهره محاسبه شده توافق خوبی دارد (29).

مشاهده کرد. با این حال، نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط کدهای TALYS، EMPIRE و MCNPX برای واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ با نتایج تجربی اختلاف ناچیزی دارند که این واقعیت را می‌توان در شکل 8 نیز مشاهده کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه مداخله‌ای شرایط بهینه تولید رادیوایزوتوپ مس-61 با پرتوده‌ای هدف توسط بار یکه فرود شتابدهنده سیکلوترون، از طریق شبیه‌سازی توسط کدهای محاسباتی TALYS-1/96، EMPIRE-3-2-2 و MCNPX-2/6 مورد بررسی قرار گرفت.

در ابتدا تابع برانگیختگی واکنش‌ها $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ ، $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ ، $^{61}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ از طریق کدهای محاسباتی TALYS و EMPIRE به دست آمد و بعد از مقایسه با نتایج تجربی، بهترین بازه انرژی که دارای بیشترین سطح مقطع واکنش و کمترین میزان ناخالصی باشد، برای آنها تعیین شد. سپس به‌طور تئوری بهره تولید این واکنش‌ها در بازه انرژی انتخابی محاسبه شد که نتایج آن در جدول 3 موجود است.

برای واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ بهره حاصل از کدهای TALYS و EMPIRE در انرژی 14 MeV به ترتیب برابر با 113/29 MBq/μAh و 183/24 MBq/μAh است؛ در حالی که داده تجربی ارائه شده توسط IAEA برابر با 155 MBq/μAh است (33). علاوه بر این، Aslam و Qaim (2014) به‌صورت تجربی این واکنش را بررسی کرده و بهره تجربی نزدیکی به 165 MBq/μAh را در انرژی 14 MeV به دست آوردند که در توافق با داده تجربی IAEA است (34). بهره به دست آمده برای واکنش $^{61}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$ بر اساس

واکنش صرفنظر کرد. یکی دیگر از مشکلات مهم در زمینه تولید رادیوایزوتوپ‌ها، کمبود تأسیسات تولید از جمله راکتورهای تحقیقاتی و شتابدهنده‌های سیکلوترون انرژی متوسط به بالا است. علاوه بر این محدودیت انرژی سیکلوترون‌های پزشکی خود به خود موجب حذف تعدادی از واکنش‌های مطلوب در تولید رادیوایزوتوپ می‌شود. برای یافتن یک واکنش مطلوب برای تولید یک رادیوایزوتوپ، نی از به انجام آزمایش است که در آزمایش‌های تجربی علاوه بر مشکلات ذکر شده؛ زمانبر بودن، هزینه‌بر بودن، مستعد خطا بودن و پرتوگری را نیز بایستی به مشکلات اضافه کرد. امروزه ابزارهای شبیه‌سازی کامپیوتری با کمترین هزینه، در کمترین زمان ممکنه، با دقت مطلوب (همان‌طور که در این مطالعه مشاهده شد) و به دور از هر نوع پرتوگری، امکان انجام محاسبات هسته‌ای در طیف وسیعی از موضوعات را فراهم کرده‌اند. از این رو پیشنهاد می‌شود قبل از انجام کارهای عملی، با استفاده از کدهای هسته‌ای همچون MCNPX، EMPIRE، TALYS و SRIM، شبیه‌سازی‌های لازم انجام شود تا بهترین واکنش ممکن بر اساس امکانات موجود به دست آید.

با توجه به فاکتورها، بهره‌تولید بالا و میزان ناخالصی پایین، دو واکنش $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ به عنوان بهترین واکنش‌های تولید ^{61}Cu در یک سیکلوترون بیمارستانی انتخاب شدند. ضخامت هدف برای واکنش‌های $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ و $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ به ترتیب در انرژی‌های 14 MeV و 9 MeV برابر با $529/09\ \mu\text{m}$ و $202/3\ \mu\text{m}$ است. بهره‌این دو واکنش از طریق شبیه‌سازی MCNPX مجدداً مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج تجربی IAEA مقایسه شدند. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که در میان این واکنش‌ها، واکنش $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ با بهره‌شبیه‌سازی MCNPX، EMPIRE، TALYS و تجربی به ترتیب $498/51\ \text{MBq}/\mu\text{Ah}$ ، $497/21\ \text{MBq}/\mu\text{Ah}$ و $470/26\ \text{MBq}/\mu\text{Ah}$ ، در انرژی 9 MeV، بهترین واکنش برای تولید ^{61}Cu در سیکلوترون‌های بیمارستانی است. یکی از مشکلات عمده در تولید رادیوایزوتوپ‌های پزشکی، قیمت بالای ایزوتوپ‌های غنی شده است. علاوه بر آن در حین استفاده از هدف‌های عنصری خالص، رادیوایزوتوپ‌های مزاحم بیشتری تولید می‌شود که برای جلوگیری از آن بایستی تا حد امکان بازه انرژی باریکه فرودی را محدود کرد. البته در بعضی از مواقع این روش نیز کارساز نیست و بایستی از آن

References:

1. Williams HA, Robinson S, Julyan P, Zweit J, Hastings D. A comparison of PET imaging characteristics of various copper radioisotopes. *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*. 2005;32:1473-80.
2. Rowshanfarzad P, Sabet M, Jalilian AR, Kamalidehghan M. An overview of copper

radionuclides and production of ^{61}Cu by proton irradiation of ^{nat}Zn at a medical cyclotron. *Appl Radiat Isot* 2006;64(12):1563-73.

3. Laforest R, Dehdashti F, Lewis JS, Schwarz SW. Dosimetry of $^{60}/^{61}/^{62}/^{64}\text{Cu}$ -ATSM: a hypoxia imaging agent for PET. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2005;32:764-70.
4. Szymański P, Frączek T, Markowicz M,

- Mikiciuk-Olasik E. Development of copper based drugs, radiopharmaceuticals and medical materials. *Biometals* 2012;25:1089-112.
5. Cohen BL, Newman E. (p, pn) and (p, 2 n) Cross Sections in Medium Weight Elements. *Phys Rev* 1955;99(3):718.
 6. Cumming J. Decay of ^{61}Zn . *Phys Rev* 1959;114(6):1600-4.
 7. Williams DC, Irvine Jr JW. Nuclear Excitation Functions and Thick-Target Yields: $\text{Zn} + \text{d}$ and $\text{Ar} 40 (\text{d}, \alpha)$. *Phys Rev* 1963;130(1):265.
 8. Bryant E, Cochran D, Knight J. Excitation Functions of Reactions of 7-to 24-MeV He 3 Ions with Cu 63 and Cu 65. *Phys Rev* 1963;130(4):1512.
 9. Cogneau M, Gilly L, Cara J. Absolute cross sections and excitation functions for deuteron-induced reactions on the nickel isotopes between 2 and 12 MeV. *Nucl Phys A* 1967;99(4):686-94.
 10. Williams I, Fulmer C. Excitation functions for radioactive isotopes produced by protons below 60 MeV on Al, Fe, and Cu. *Phys Rev* 1967;162(4):1055.
 11. Fulmer C, Williams I. Excitation functions for radioactive nucleides produced by deuteron-induced reactions in copper. *Nucl Phys A* 1970;155(1):40-8.
 12. Tanaka S, Furukawa M, Chiba M. Nuclear reactions of nickel with protons up to 56 MeV. *J Inorg Nucl Chem* 1972;34(8):2419-26.
 13. Homma Y, Murakami Y. Production of ^{61}Cu by α -and ^3He bombardments on cobalt target. *Chem Lett* 1976;5(5):397-400.
 14. Muramatsu H, Shirai E, Nakahara H, Murakami Y. Alpha particle bombardment of natural nickel target for the production of ^{61}Cu . *Int J App Radiation Isotopes* 1978;29(11):611-4.
 15. Tolmachev V, Lundqvist H, Einarsson L. Production of ^{61}Cu from a natural nickel target. *Appl Radiat Isot* 1998;49(1-2):79-81.
 16. Szelecsényi F, Suzuki K, Kovács Z, Takei M, Okada K. Production possibility of 60, 61, ^{62}Cu radioisotopes by alpha induced reactions on cobalt for PET studies. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2002;187(2):153-63.
 17. Cohen B, Newman E, Charpie R, Handley T. (p, pn) and (p, α n) Excitation Functions. *Phys Rev* 1954;94(3):620.
 18. Levkovski V. Cross sections of medium mass nuclide activation ($A= 40-100$) by medium energy protons and alpha-particles ($E= 10-50$ MeV). Inter-Vesi, Moscow, USSR. 1991.
 19. Gyürky G, Fülöp Z, Halász Z, Kiss G, Szücs T. Direct study of the α -nucleus optical potential at astrophysical energies using the $\text{Zn } 64 (\text{p}, \alpha) \text{Cu } 61$ reaction. *Phys Rev C* 2014;90(5):052801.
 20. Uddin M, Khandaker M, Kim K, Lee Y, Kim G. Excitation functions of the proton induced nuclear reactions on natZn up to 40 MeV. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2007;258(2):313-20.
 21. Asad AH, Chan S, Morandea L, Cryer D, Smith SV, Price RI. Excitation functions of natZn (p, x) nuclear reactions with proton beam energy below 18 MeV. *Appl Radiat Isot* 2014;94:67-71.
 22. Szelecsényi F, Blessing G, Qaim S. Excitation functions of proton induced nuclear reactions on enriched ^{61}Ni and ^{64}Ni : Possibility of production of no-carrier-added ^{61}Cu and ^{64}Cu at a small cyclotron. *Appl Radiat Isot* 1993;44(3):575-80.
 23. Singh B, Sharma MK, Musthafa M, Bhardwaj H, Prasad R. A study of pre-equilibrium emission in some proton-and alpha-induced reactions. *Nucl Instrum Methods Phys Res A* 2006;562(2):717-20.
 24. Aslam M, Qaim SM. Nuclear model analysis of excitation functions of proton, deuteron and α -particle induced reactions on nickel isotopes for production of the medically interesting copper-61. *Appl Radiat Isot* 2014;89:65-73.
 25. Tingwell CIW, Hansper VY, Tims SG, Scott AF,

- Sargood DG. Cross sections of proton induced reactions on ^{61}Ni . Nucl Phys A 1988;480(1):162–74. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474\(88\)90390-9](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474(88)90390-9)
26. Antropov A, Gusev V, Zhuravlev Y, Zarubin P, Kolozhvari A, Smirnov A. Total cross sections of (p, n) reaction on the nuclei of isotopes nickel and zink at E (p) $\frac{1}{4}$ 5–6. MeV. Bull Russ Acad Sci: Phys 1992;56:1829.
27. Al Saleh F, Al Mugren KS, Azzam A. Excitation functions of (p, x) reactions on natural nickel between proton energies of 2.7 and 27.5 MeV. Appl Radiat Isot 2007;65(1):104-13.
28. Adel D, Mohamed GY, Yousef Z, Abd El Wahab M, Ditroi F, Takács S, et al. Experimental investigation and theoretical evaluation of proton induced nuclear reactions on nickel. Appl Radiat Isot 2020;159:109094.
29. Amjed N, Tárkányi F, Hermanne A, Ditroi F, Takacs S, Hussain M. Activation cross-sections of proton induced reactions on natural Ni up to 65 MeV. Appl Radiat Isot 2014;92:73-84.
30. Hermanne A, Rebeles RA, Tárkányi F, Takacs S. Excitation functions of proton induced reactions on ^{nat}Ni up to 65 MeV: Experiments and comparison with results from theoretical codes. Nucl Instrum Methods Phys Res B 2015;345:58-68.
31. Uddin MS, Chakraborty AK, Spellerberg S, Shariff MA, Das S, Rashid MA, et al. Experimental determination of proton induced reaction cross sections on ^{nat}Ni near threshold energy. Radiochimica Acta 2016;104(5):305-14.
32. Fegghi SA, Gholamzadeh Z, Alipoor Z, Zali A, Joharifard M, Aref M, et al. A benchmark study on uncertainty of ALICE ASH 1.0, TALYS 1.0 and MCNPX 2.6 codes to estimate production yield of accelerator-based radioisotopes. Pramana 2013;81:87-101.
33. Tárkányi F, Ignatyuk A, Hermanne A, Capote R, Carlson B, Engle JW, et al. Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic positron emitters. J Radioanal Nucl Chem 2019;319:533-666.
34. Aslam M, Qaim S. Nuclear model analysis of excitation functions of proton and deuteron induced reactions on ^{64}Zn and ^3He - and α -particle induced reactions on ^{59}Co leading to the formation of copper-61: Comparison of major production routes. Appl Radiat Isot 2014;94:131-40.

COMPARISON OF COPPER-61 RADIOISOTOP PRODUCTION YIELD VIA REACTIONS OF $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$, $^{\text{NAT}}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$, $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$, AND $^{\text{NAT}}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ IN HOSPITAL CYCLOTRON USING TALYS, EMPIRE, AND MCNPX NUCLEAR CODES

Maedeh Hasani¹, Alireza Azadbar*²

Received: 06 November, 2022; Accepted: 19 April, 2023

Abstract

Background & Aims: Copper-61 (^{61}Cu) is a radioisotope with a half-life of 3.33 hours which decays to nickel-61 isotope by β^+ emission (61%) or electron capture (39%). This radioisotope can be used in the evaluation of the blood supply of the heart and low-oxygen cancer tissues imaging with PET. ^{61}Cu is mainly produced by bombarding zinc (Zn), nickel (Ni) and cobalt (Co) targets in medium cyclotrons. The aim of this study was to investigate the ^{61}Cu production yield via the reactions of $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$, $^{\text{nat}}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$, $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$, and $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ in hospital cyclotrons.

Materials & Methods: In this experimental study, the excitation functions of these reactions were calculated by TALYS-1/96 and EMPIRE-3-2-2 codes, and the best energy with highest reaction cross-section and lowest impurity was determined. The stopping power and target thickness at the selected energy were calculated by SRIM-2013 code. ^{61}Cu production yield was obtained by integrating the production yield formula in MATLAB environment, and compared with the results of MCNPX-2/6 simulation and experimental works.

Results: The maximum yield of the TALYS code for $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$, $^{\text{nat}}\text{Zn}(p,x)^{61}\text{Cu}$, $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$, and $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^{61}\text{Cu}$ at 14, 14, 9 and 20 MeV were 113/29, 55/07, 498/51 and 46/51 MBq/ μAh , respectively. The maximum yield of the EMPIRE code for $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ and $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ at 14 and 9 MeV were 183/24 and 497/21 MBq/ μAh , respectively. The maximum yield of MCNPX code for $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ and $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ at 14 and 9 MeV were 90/73 and 470/26 MBq/ μAh , respectively. The maximum experimental yield of $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$ and $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ at 14 and 9 MeV were 155 and 461/32 MBq/ μAh , respectively.

Conclusion: It could be concluded from the comparison of simulation and experimental results that these results are in concurrence with $^{61}\text{Ni}(p,n)^{61}\text{Cu}$ at 9 MeV, and this reaction in this energy is the best reaction for producing ^{61}Cu in hospital cyclotrons.

Keywords: Cu-61, Hospital Cyclotron, Monte Carlo Simulation, Nickel, Production Yield, Zinc

Address: Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Lahijan, Iran

Tel: +989112363159

Email: azadbar@liau.ac.ir

SOURCE: STUD MED SCI 2023; 33(12): 838 ISSN: 2717-008X

Copyright © 2023 Studies in Medical Sciences

This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, as long as the original work is properly cited.

¹ MSc Student, Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Lahijan, Iran

² Assistant Professor, Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Lahijan, Iran (Corresponding Author)