J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 40, pp. 19-24, 2007

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ٤٠، صفحات ٢٤-١٩، ١٣٨٦

تعیین شدت و طیف نوترون‌های حاصل از بمباران هدف Tl-203 دارای زیر لایه مسی با پروتون‌های ۲۸/۵MeV

ناهید حاجیلو*[1]، غلامرضا رئیس‌علی[1]، سعید حمیدی[2]، غلامرضا اصلانی[1]

۱- پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج ـ ایران

۲- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، صندوق پستی: ۸۷۹، اراک ـ ایران

چکیده: در این کار پژوهشی به تعیین شدت و طیف نوترون‌های حاصل از بمباران هدف تالیوم-۲۰۳ به وسیلهٔ پروتون‌های با انرژی ۲۸/۵MeV و جریان ۱۴۵μA حاصل از سیکلوترون «Cyclone30» پرداخته شده است. با توجه به کاهش انرژی پروتون‌ها به هنگام عبور از ضخامت هدف تالیوم و زیر لایه مسی، انرژی متوسط پروتون‌ها در عمق‌های مختلف با استفاده از برنامه SRIM بدست آمد. به ازای انرژی متوسط پروتون در هر لایه، سطح مقطع انجام واکنش و توزیع انرژی نوترون‌های تولید شده به وسیلهٔ کد ALICE حساب شد و با استفاده از مقادیر بدست آمده، شدت و طیف کل نوترون‌های تولیدی از تالیوم و مس تعیین گردید. با به کاربردن مشخصات چشمه بدست آمده به شدت $1/22\times10^{13}$ n/s در کد MCNP/4C، نرخ دُز معادل نوترون در فاصله ۶ متری از چشمه نوترون حساب و با نتایج تجربی مقایسه شد. همچنین آکتیویته محصول بمباران (^{201}Pb) حساب شد و مقدار اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۱۳/۵Ci و ۱۳/۱Ci بدست آمد که با توجه به تقریب‌های محاسبه و خطای اندازه‌گیری، با یکدیگر در توافق قابل قبولی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تالیوم ۲۰۳ هدف، باریکه‌های پروتون، شدت، طیف انرژی، سطوح مقطع، کدهای کامپیوتری

Determination of Intensity and Energy Spectrum of Neutrons by Bombardment of Thallium-203 Thick Target and its Copper Substrate with 28.5 MeV Protons

N. Hajiloo*[1], Gh. Raisali[1], S. Hamidi[2], Gh. Aslani[1]

1- Agricultural, Medical and Industrial Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 31485-498, Karaj – Iran

2- Physics Department, Faculty of Sciences,University of Arak, P.O. Box: 879, Arak – Iran

Abstract: In this research we have determined neutrons spectrum and the intensity that produced from thallium target bombardment. We have applied SRIM and ALICE computer codes to thallium target and its copper substrate for 145 μA of 28.5 MeV incident proton beam from cyclotron Cyclone30. Because of the energy degradation of protons while passing through the thallium target and its copper substrate, the average energy of protons in different depths has been calculated by using SRIM computer code. Then, by applying ALICE computer code for each sub-layer, the neutron production cross sections and their energy spectrum have been calculated to determine the total neutron intensity and spectrum. Using the calculated neutron intensity of 1.22×10^{13} n/s as the source, the equivalent dose rate at the distance 6 meters from the target has been calculated by MCNP computer code and the result has been compared with the measured value. The ^{201}Pb activity has also been calculated as 13.5 Curies. The measured ^{201}Pb activity by Curie meter CAPINTEC CRC-712 is 13.1 Ci which is in reasonable agreement with the calculated value, bearing in mind the uncertainties in the proposed models and the measurements.

Keywords: ***Thallium 203 Target, Proton Beams, Intensity, Energy Spectrum, Cross Sections, Computer Codes***

*email: nhajiloo@nrcam.org

تاریخ دریافت مقاله: ۸۴/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۵/۸/۱۷

۱- مقدمه

رادیوداروی Tl-201 که در تصویربرداری از میوکارد برای تشخیص بیماری‌های کرونر قلب و انفارکتوس میوکارد بکار می‌رود در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران تولید می‌شود. برای تولید این رادیودارو، ایزوتوپ Tl-203 تحت تابش باریکه پروتون با انرژی ۲۸/۵MeV که از سیکلوترون مدل Cyclone30 بدست می‌آید، قرار می گیرد. این عنصر از طریق واکنش (P,3n) به Pb-201 با نیمه‌عمر ۹/۴ ساعت تبدیل می‌شود و پس از آن به Tl-201 با نیمه‌عمر ۷۳/۱ ساعت تبدیل می گردد [۱].

برای آماده کردن هدف تالیومی، حدود یک گرم تالیوم-۲۰۳ با درجهٔ خلوص ایزوتوپی ۹۸٪ بر روی یک زیرلایه مسی به مساحت $10cm^2$ لایه‌نشانی می‌شود؛ ضخامت تالیوم در این صورت حدود ۹۰ میکرون خواهد شد. سپس پرتو پروتون با زاویه ۶ درجه به این هدف تابانیده می‌شود که ضخامت مؤثر آن در این حالت به حدود ۹۰۰ میکرون می‌رسد. چون تعداد ناچیزی از اتم‌های Tl-203 با پروتون اندرکنش می کنند، شدت جریان پرتو پروتون در طی ضخامت هدف (قبل از توقف) تقریباً ثابت می‌ماند ولی از انرژی پروتون‌ها هنگام عبور از ضخامت هدف، به دلیل وجود اندرکنش‌های کولنی با اتم‌ها کاسته می‌شود؛ ضخامت لایه تالیومی در حدی در نظر گرفته شده است که انرژی پروتون‌ها در هنگام خروج از هدف تالیوم حدود ۱۸MeV باشد زیرا در انرژی‌های پایین‌تر از آن سطح مقطعی برای تولید محصول موردنظر وجود ندارد [۲ و ۳]. بعد از آن پروتون‌ها وارد زیرلایه مسی شده و در نهایت، پس از انجام واکنش‌هایی در آن متوقف می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌ای از هدف تالیوم آماده شده را نشان می‌دهد.

شکل ۱- نمونه‌ای از هدف تالیوم آماده شده که بر روی زیرلایه مسی لایه‌نشانی شده است.

در این مقاله به منظور تعیین شدت و طیف چشمه‌های نوترون حاصل از اندرکنش‌های مختلف پرتو پروتون با تالیوم و مس از برنامه کامپیوتری SRIM [۴] و کد ALICE [۵ و ۶] استفاده شده است. کد ALICE محاسبات مربوط به واپاشی هسته مرکب تعادل یافته را بر اساس مدل آماری وایسکوف- اوینگ و محاسبات مربوط به واپاشی هسته مرکب پیش از تعادل را با استفاده از مدل هایبرید (Hybrid) انجام می‌دهد.

برای اطمینان از صحت محاسبات، آکتیویته محصول بمباران (^{201}Pb) با کد ALICE حساب شده و با مقدار بدست آمده از اندازه‌گیری توسط کوریمتر مقایسه شده است. همچنین برای ارزیابی نتایج بدست آمده، نرخ دُز معادل نوترون در فاصله ۶ متری از هدف در حال بمباران با استفاده از کد کامپیوتری MCNP/4C [۷] حساب شده و با مقداری که به وسیلهٔ آشکارساز نوترون مدل LB6411 ساخت شرکت Berthold [۸] اندازه‌گیری شده مقایسه شده است.

۲- روش کار

به دلیل تغییر انرژی پروتون‌ها به هنگام عبور از ضخامت هدف تالیوم و زیرلایه مسی، برای تعیین شدت و طیف نوترون‌های تولیدی در اثر بمباران هدف، هدف تالیوم و زیرلایه مسی را به زیر لایه‌هایی تقسیم کرده و در هر زیرلایه انرژی متوسط پروتون را به کمک برنامه SRIM بدست آورده‌ایم. با استفاده از آن سطح مقطع انجام واکنش‌ها را به وسیلهٔ کد ALICE حساب و در نتیجه شدت و طیف نوترون‌ها را تعیین کرده‌ایم.

با استفاده از محاسبات کد ALICE آکتیویته محصول بمباران حساب و با مقدار بدست آمده از اندازه‌گیری مقایسه شده است؛ همچنین با استفاده از شدت و طیف چشمه نوترونی در هنگام بمباران هدف تالیوم و با تعریف مواد بکار رفته در حفاظ پرتوها و هندسه اتاق هدف موردنظر نرخ دُز معادل نوترون در فاصله ۶ متری از هدف در حین بمباران با استفاده از کد MCNP حساب شد، همچنین این کمیت با استفاده از آشکارساز نوترون اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد.

۲-۱ محاسبه شدت نوترون‌های حاصل از بمباران هدف

برای تعیین شدت نوترون‌های تولیدی، نیاز به سطح مقطع واکنش‌های نوترون‌زا می‌باشد که برحسب انرژی پروتون متغیر است. به دلیل تغییر انرژی پروتون‌ها در عبور از ضخامت هدف

تالیومی و زیرلایه مسی و تغییر سطح مقطع واکنش‌ها و در نتیجه داشتن شدت‌های مختلف برای تولید نوترون، ضخامت لایه‌های تالیوم و مس را به زیرلایه‌هایی فرضی تقسیم کرده و به وسیلهٔ برنامه کامپیوتری SRIM توان بازدارندگی تالیوم و مس برای پروتون در هر یک از زیرلایه‌ها حساب شد. بدین ترتیب که با داشتن انرژی پروتون هنگام ورود به هر زیرلایه (E_i) انرژی پروتون خروجی از آن زیرلایه (E_o) با استفاده از توان بازدارندگی پروتون در انرژی E_i در آن زیر لایه "$(dE/dX)_{E_i}$" و ضخامت لایه "Δx" با استفاده از رابطه (۱) حساب شده است.

$$E_{\circ} = E_i - \left(\frac{dE}{dX}\right)_{E_i} \Delta X \qquad (۱)$$

با توجه به این که انرژی پروتون خروجی از هر زیر لایه به عنوان انرژی ورودی به زیر لایه بعدی می‌باشد، تا عمقی از ضخامت مس که پروتون‌ها متوقف می‌شوند، این عملیات تکرار شده است. پس از انجام محاسبات اولیه، در حالت بهینه، ضخامت زیرلایه (Δx) برای تالیوم ۳۵ میکرون (جمعاً ۲۶ زیرلایه) و برای مس ۵۰ میکرون (جمعاً ۱۳ زیرلایه) در نظر گرفته شده است. با مشخص شدن انرژی‌های ورودی و خروجی هر یک از زیرلایه‌ها، متوسط انرژی ورودی و خروجی پروتون برای محاسبه سطح مقطع تولید نوترون و طیف نوترون‌ها در هر زیرلایه، جهت انجام محاسبات در کد ALICE استفاده شده است.

با در نظر گرفتن ۲۶ انرژی متوسط پروتون، متناظر با هر زیرلایه تالیوم و ۱۳ انرژی متوسط پروتون متناظر با هر زیرلایه مس، سطح مقطع کل تولید نوترون حاصل از تمام اندرکنش‌های ممکن، همچنین طیف آنها ناشی از هر زیرلایه در ۵۶ گروه انرژی با استفاده از کد ALICE حساب شده است.

در این مقاله سطح مقطع تولید نوترون به سطح مقطع ارائه شده در خروجی کد ALICE اطلاق شده که عبارت است از حاصل جمع سطح مقطع هر واکنش نوترون‌زا ضربدر تعداد نوترون‌های تولیدی.

در خروجی کد ALICE در بازه‌های مختلف انرژی خروجی که پهنای آن برابر ۰/۵MeV انتخاب شده است، سطح مقطع نوترون‌های تولیدی به ازای واحد انرژی نوترون خروجی برحسب mb/MeV و در انتها سطح مقطع کل تولید نوترون برحسب mb گزارش شده است. با داشتن سطح مقطع کل تولید نوترون در هر انرژی متوسط، متناظر با زیرلایه‌های مختلف، می‌توان شدت تولید نوترون در هر زیرلایه را با استفاده از رابطه زیر حساب کرد:

$$Sn=\frac{\rho N_A \sigma I d}{Me} \qquad (۲)$$

پارامترهای به کار رفته در این رابطه به شرح زیر می باشند:

S_n، تعداد نوترون‌های تولید شده در هر زیرلایه در واحد زمان برحسب s^{-1}

ρ، چگالی عنصر (ρ_{Tl}=۹/۳۲gr/cm^3 و ρ_{Cu} =۸/۹۲gr/cm^3)،

N_A، عدد آووگادرو برابر ۶/۰۲×۱۰^{۲۳} mole^{-1}

σ، سطح مقطع تولید نوترون در هر زیرلایه برحسب $(۱۰^{-۲۴}\text{barn})\,\text{cm}^{۲}$

I، شدت جریان پروتون‌های فرودی که برابر ۱۴۵×۱۰$^{-۶}$ C/s است.

d، ضخامت هر زیر لایه عنصر (برای تالیوم ۳۵μ و برای مس ۵۰μ) برحسب cm

M، عدد جرمی برحسب gr/mole

e، بار الکتریکی الکترون برابر ۱/۶×۱۰$^{-۱۹}$C

با جمع نوترون‌های ایجاد شده در زیرلایه‌های تالیوم و زیرلایه‌های مس، شدت کل نوترون‌های تولیدی در اثر بمباران هدف بدست می‌آید.

۲-۲ محاسبه طیف نوترون‌های حاصل از بمباران هدف

برای بدست آوردن طیف نوترون‌های تولیدی از مس و تالیوم، ابتدا سطح مقطع‌های میکروسکوپی تولید نوترون به ازای واحد انرژی مربوط به انواع واکنش‌های نوترون‌زای ممکن در کلیه زیرلایه‌های هر ماده در بازه‌های متناظر، که در خروجی کد ALICE گزارش شده، با یکدیگر جمع‌زده شدند تا سطح مقطع میکروسکوپی دیفرانسیلی معادل مربوط به هر بازه انرژی برای هر ماده، با پهنای ۰/۵MeV بدست آید. لازم بود این کار، هم برای تالیوم و هم برای مس صورت گیرد سپس برای تعیین سطح مقطع‌های ماکروسکوپی معادل، سطح مقطع در هر بازه در مقدار $\rho d/M$ به عنوان ضریب وزنی هسته‌های موجود از هر ماده به صورت جداگانه ضرب شد. به این ترتیب طیف نوترونهای حاصل از هریک از مواد تالیوم و مس به صورت جداگانه بدست می‌آید. برای تعیین طیف کل نوترون‌های تولیدی، دو مقدار بدست آمده مربوط به مس و تالیوم در هر بازه انرژی نوترون‌های تولیدی با یکدیگر جمع می‌شوند.

۲-۳ محاسبه نرخ دز معادل نوترون در فاصله معینی از هدف

برای محاسبه نرخ دز نوترون در فاصله معین از هدف، از کد کامپیوتری MCNP استفاده شده است. با معرفی مشخصات هندسی اتاق هدف که از جنس بتون معمولی با چگالی ۲/۳۵ gr/cm^3 می‌باشد، در فایل ورودی کد MCNP همچنین با در نظر گرفتن چشمه نقطه‌ای همسانگرد برای نوترون با شدت و طیف متناظر با آنچه که با استفاده از کد ALICE بدست آمده و با تعریف یک کره هوا به شعاع ۱۵cm بعنوان آشکارساز [۹] در فاصله۶ متری از هدف، چگالی شار نوترون با بکار بردن تالی F4 در آشکارساز فرضی حساب می‌شود و با استفاده از ضرایب تبدیل شار نوترون به نرخ دز معادل [۱۰] میزان آهنگ دز معادل نوترون با استفاده از رابطه (۳) حساب می‌شود.

$$H=\int DF(E)\varphi(E)dE \qquad (۳)$$

که در آن DF(E) ضریب تبدیل شار نوترون به نرخ دز معادل و φ(E) شار دیفرانسیلی پرتوها می‌باشد.

۲-۴ محاسبه آکتیویته ^{201}Pb تولید شده از واکنش $^{203}Tl(P,3n)^{201}Pb$

میزان آکتیویته سرب ۲۰۱ تولید شده از واکنش $^{203}Tl(P,3n)^{201}Pb$ را می‌توان با استفاده از رابطه زیر پیش‌بینی کرد.

$$A_{pb}(t=t_1+t_2)=R(1-e^{-\lambda_{pb}t_1})e^{-\lambda_{pb}t_2} \qquad (۴)$$

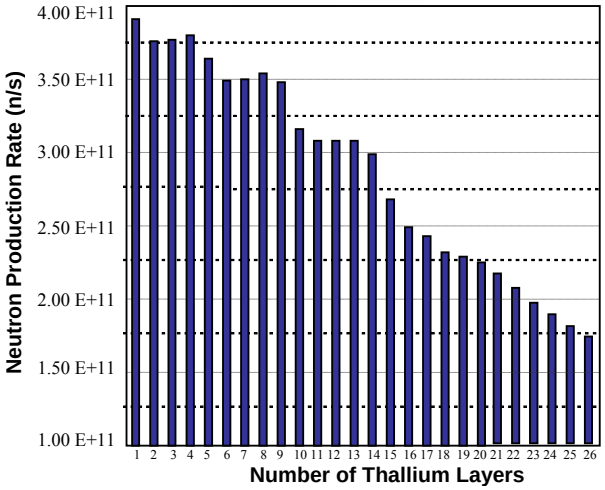
در این رابطه، A آکتیویته در مدت اندازه‌گیری، R نرخ اندرکنش‌های تولید سرب ۲۰۱، λ ثابت واپاشی سرب ۲۰۱، t_1 مدت بمباران و t_2 فاصله زمانی بین پایان بمباران تا اندازه‌گیری می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار R با استفاده از کد ALICE حساب شده است، می‌توان با تأیید تجربی مقدار حساب شده، به ارزیابی شدت نوترون‌ها پرداخت.

۳- نتایج محاسبات و اندازه‌گیری

با تقسیم ضخامت هدف تالیوم و زیرلایه مسی آن به لایه‌های مختلف، توان بازدارندگی مس و تالیوم برای پروتون‌ها با استفاده از برنامه SRIM به دست آمد. در جدول ۱ به عنوان نمونه، توان بازدارندگی تالیوم در مورد پروتون برای چندین لایه منظور شده، برحسب ضخامت آورده شده است. همچنین انرژی پروتون ورودی و خروجی برای چندین لایه در نظر گرفته شده برای تالیوم و انرژی متوسط نسبت داده شده به هر لایه، که با استفاده از برنامه SRIM محاسبه شده، نیز در این جدول داده شده است. با بکار بردن انرژی متوسط پروتون در هر یک از زیرلایه‌های در نظر گرفته شده برای تالیوم و مس در کد ALICE سطح مقطع تولید نوترون در هر انرژی پروتون تعیین و شدت تولید نوترون در هر زیرلایه تعیین شد. در جدول ۱ سطح مقطع تولید نوترون به ازای انرژی متوسط نسبت داده شده به چند زیر لایه تالیوم آورده شده است. همچنین شدت تولید نوترون در هر ۲۶ زیرلایه فرض شده برای تالیوم و در هر ۱۳ زیرلایه فرض شده برای مس حساب شده است. در شکل ۲ شدت تولید نوترون در زیرلایه‌های فرض شده برای تالیوم نشان داده شده است. در اثر بمباران هدف، در تالیوم $۷/۴۵\times۱۰^{۱۲}$ n/s و در مس $۴/۷۷\times۱۰^{۱۲}$ n/s بوجود می‌آید که جمعاً $۱/۲۲\times۱۰^{۱۳}$ n/s در اثر بمباران هدف تولید می‌شود.

جدول ۱- انرژی ورودی، خروجی و متوسط پروتون در چندین زیرلایهٔ منظور شده برای تالیوم و نیز توان بازدارندگی تالیوم برای پروتون و سطح مقطع میکروسکوپی تولید نوترون در هر زیرلایه.

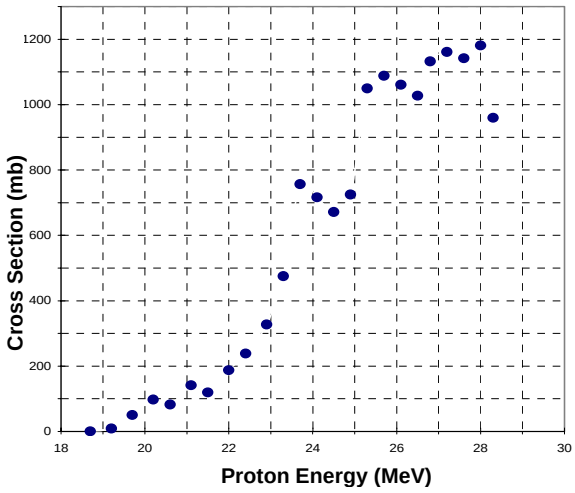
شماره لایه	ضخامت (μ)	E_i (MeV)	$\frac{dE}{dX}(\frac{keV}{\mu})$	$E_\circ$(MeV)	$\bar{E}=(E_i+E_\circ)/2$ (MeV)	σ (mb)
1	0 –35	28.5	1.028E+1	28.14	28.32	4620
2	35 –70	28.14	1.037E+1	27.77	27.955	4440
3	70 – 105	27.77	1.046E+1	27.40	27.58	4450
4	105 – 140	27.40	1.056E+1	27.03	27.215	4490
5	140 – 175	27.03	1.067E+1	26.65	26.84	4300
6	175 – 210	26.65	1.078E+1	26.27	26.46	4130
7	210 – 245	26.27	1.089E+1	25.88	26.07	4140
8	245 – 280	25.88	1.100E+1	25.49	25.68	4180
9	280 – 315	25.49	1.112E+1	25.1	25.295	4110
10	315 – 350	25.1	1.123E+1	24.7	24.9	3640



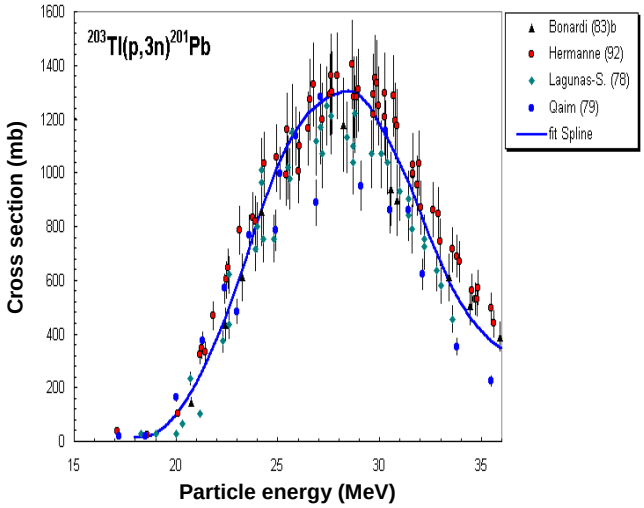
شکل ۲- شدت تولید نوترون در لایه‌های مختلف تالیوم (حساب شده با استفاده از کد کامپیوتری ALICE) هنگامی که پروتون‌ها با انرژی ۲۸/۵MeV و جریان متوسط ۱۴۵μA بر آن بتابند.

برای اطمینان از صحت محاسبات انجام شده با استفاده از کد ALICE آکتیویته پیش‌بینی شدهٔ ^{201}Pb با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. به این ترتیب که پس از ۹/۶۳ ساعت بمباران و بعد از گذشت ۱/۲۵ ساعت از پایان بمباران، آکتیویته ^{201}Pb به وسیلهٔ کوری‌متر CAPINTEC CRC-712 اندازه‌گیری شد و مقدار آن برابر ۱۳/۱Ci بدست آمد، همچنین با استفاده از سطح مقطع‌های محاسبه شده با کد ALICE آکتیویته محصول بمباران برابر ۱۳/۵Ci تعیین گردید. لازم به ذکر است، سطح مقطع‌های بدست آمده از کد ALICE قابل مقایسه با محاسبات و اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در گذشته بوده است. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب سطح مقطع واکنش تولید ^{201}Pb حساب شده با استفاده از کد ALICE، همچنین مقادیر حساب شدهٔ قبلی آورده شده است [۱۱]. همان‌گونه که در این دو شکل دیده می‌شود، در محدوده انرژی محاسبات انجام گرفته تطابق نسبتاً قابل قبولی وجود دارد.

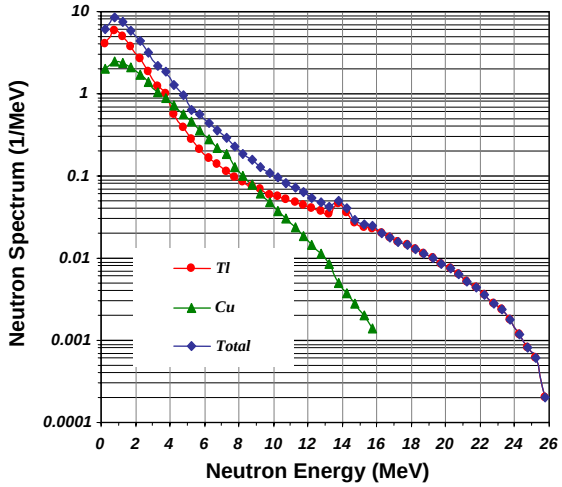
طیف حساب شده برای نوترون‌های تولیدی در تالیوم، مس و مجموعه هدف در شکل ۵ نشان داده شده است. از شدت و طیف حساب شده برای نوترون‌های تولیدی در هنگام بمباران هدف، برای محاسبه نرخ دز معادل نوترون با استفاده از کد کامپیوتری MCNP در فاصله ۶ متری از هدف استفاده شد و نرخ دز معادل نوترون در این نقطه برابر $۱/۰۵\times۱۰^{۷}$ μSv/hr بدست آمد.



شکل ۳- سطح مقطع تولید نوترون‌های حاصل از واکنش $^{203}Tl\ (p, 3n)^{201}Pb$ برحسب انرژی پروتوون‌های فرودی حساب شده به کمک کد (ALICE91).



شکل ۴- سطح مقطع (p,3n) به ازای انرژی‌های مختلف پروتون که از چندین روش محاسباتی بدست آمده است.



شکل ۵- طیف نوترون‌های حاصل از تالیوم، مس و کل هدف.

همچنین مقدار نرخ دُز معادل نوترون توسط آشکارساز مدل LB 6411 [۸] ساخت شرکت Berthold در حین بمباران هدف تالیوم با جریان ۱۴۵ μA اندازه‌گیری شد و پس از اعمال ضرایب تصحیح آشکارساز بر اساس طیف انرژی نوترون‌های نتیجه شده از کد MCNP برابر $۱/۲۸\times۱۰^{۷}$ μSv/hr بدست آمد که در توافق خوبی با مقدار حساب شده است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

شدت کل نوترون‌های تولیدی از هدف تالیوم و زیرلایه مسی جمعاً برابر $۱/۲۲\times۱۰^{۱۳}$ n/s بدست آمد. برای اطمینان از صحت محاسبات، آکتیویته ^{201}Pb تولیدی با استفاده از سطح مقطع‌های حساب شده با استفاده از کد ALICE حساب شد و مقدار آن برابر ۱۳/۵Ci بدست آمد که با نتیجه اندازه‌گیری ۱۳/۱Ci با دستگاه کوری‌متر CAPINTEC CRC-712 (با دقت حدود ۱۰٪) با توجه به مدل‌های محاسباتی و تقریب‌های صورت گرفته در توافق قابل قبولی می‌باشند، همچنین سطح مقطع‌های حساب شده برای یکی از واکنش‌ها (واکنش (p,3n)) با مقادیر حساب شده قبلی مقایسه شد، با استناد به محاسبات انجام گرفته توسط دیگران می‌توان گفت که سطح مقطع‌هایی که شدت و طیف نوترون‌ها با استفاده از آنها حساب شده‌اند دارای دقت بالایی هستند [۱۱].

همچنین طیف کل نوترون‌های تولیدی در اثر بمباران حساب شد و با استفاده از طیف به دست آمده، نرخ دُز معادل نوترون با استفاده از کد MCNP در فاصله ۶ متری هدف محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه گردید که به ترتیب مقادیر $۱/۰۵\times۱۰^{۷}$ μSv/hr و $۱/۲۸\times۱۰^{۷}$ μSv/hr بدست آمد که اختلاف آنها حدود ۲۰ درصد می‌باشد. از آنجایی که شدت و طیف چشمه نوترونی به منظور بررسی حفاظ اتاقک پرتودهی هدف تالیوم تعیین گردیده است، می‌توان گفت نتایج بدست آمده و درصد اختلاف آنها قابل قبول می‌باشد.

از عوامل و منابع خطاهای محاسبات و اندازه‌گیری می‌توان به خطای محاسبات کد ALICE در تعیین شدت و طیف نوترون، خطای محاسبات کد MCNP در محاسبه نرخ دُز معادل نوترون، خطای شبیه‌سازی هندسه و مواد، خطای تنظیم انرژی پروتون‌های تولیدی با استفاده از سیکلوترون که در حدود ۲٪ است و خطای آشکارساز در اندازه‌گیری نرخ دُز معادل نوترون اشاره کرد.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم از آقایان دکتر محمد میرزائی، مهندس ارژنگ شاهور و دیگر دوستانی که در این کار ما را یاری کرده‌اند، سپاسگزاری و قدردانی نماییم.

References:

1. S.M. Qaim, R. Weinreich, H. Ollig, "Production of 201Tl and 203Pb via proton induced nuclear reactions on natural thallium," International Journal of Applied Radiation and Isotopes. Vol. 30, 85-95 (1978).
2. A.I. Dityuk, Y.N. Shubin, "Model calculations and optimization method in evaluation of nuclear data for medical radioisotope production," Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 2, 1306-1309 (2002).
3. F. Tarkanyi and S. Takacs, "Status of the database for production of medical radioisotopes of 103Pd, 123,124I, 201Tl by using Rh, Te and Tl targets," Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 2, 1318-1321 (2002).
4. J.F. Ziegler and J.P. Biersack, "SRIM 2003. 20," http://www.SRIM.org.
5. M. Blann, J. Bisplinghoff, "Code ALICE/Livermore 82," Report UCID-19614, Lawrence Livermore National Laboratory, CA (1982).
6. S.A. Durrani, R.K. Bull, "Solid State Nuclear Track Detection," Pergamon Books Ltd (1987).
7. J.F. Briesmeister, editor, "MCNP-4C A general Monte Carlo N-Particle Transport Code System-Version 4C," Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M (2000).
8. EG&G Berthold, "Operating Manual of Neutron Probe LB6411," Id. No. 1-20188-82042 BA2 Rev. No. 01 (1996).
9. ICRU, "Radiation Quantities and units," ICRU Report 33 (1980).
10. ICRP Publication 74, "Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation," Pergamon (1995).
11. S.M. Qaim and T. Tarkanyi, "Charged-particle cross section database for medical radioisotope production," Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 2 (2002).