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

ناهید حاجیلو^{*(}، غلامرضا رئیسعلی⁽، سعید حمیدی^۲، غلامرضا اصلانی⁽ 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 ۱۴۵۹۸ 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 اکتره ۲۰×۲۰۱۰ 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 (¹⁰¹) حساب شد و مقدار اندازه گیری شده به ترتیب برابر با ۱۳/۵C و ۱۳/۱۰۲ بدست آمد که با توجه به تقریبهای محاسبه و خطای اندازه گیری، با یکدیگر در توافق قابل قبولی می باشد.

واژه های کلیدی: تالیوم ۲۰۳ هدف، باریکه های 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. Raisali¹, S. Hamidi², Gh. Aslani¹

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 μ A 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 ²⁰¹Pb activity has also been calculated as 13.5 Curies. The measured ²⁰¹Pb 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

۱ – مقدمه

رادیوداروی TI-201 که در تصویربرداری از میو کارد برای تشخیص بیماری های کرونر قلب و انفار کتوس میو کارد بکار میرود در پژوه شکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران تولید می شود. برای تولید این رادیودارو، ایزوتوپ 203-TI تحت تابش باریکه پروتون با انرژی ۲۸/۵MeV که از سیکلوترون مدل Cyclone30 بدست می آید، قرار می گیرد. این عنصر از طریق واکنش (P,3n) به Pb-201 با نیمه عمر ۹/۴ ساعت تبدیل می شود و پس از آن به TI-201 با نیمه عمر ۱/۳ ساعت تبدیل می گردد [۱].

براي آماده كردن هدف تاليومي، حدود يك گرم تاليوم-۲۰۳ با درجهٔ خلوص ایزوتوپی ۹۸٪ بر روی یک زیرلایه مسی به مساحت ^۲ ۱۰cm لایهنشانی میشود؛ ضخامت تالیوم در این صورت حدود ۹۰ میکرون خواهد شد. سپس پرتو پروتون با زاویه ۶ درجه به این هدف تابانیده می شود که ضخامت مؤثر آن در این حالت به حدود ۹۰۰ میکرون میرسد. چون تعداد ناچیزی از اتم های Tl-203 با پروتون اندر کنش 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 اندر کنش های کولنی با اتمها کاسته می شود؛ 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 پایین تر 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 واکنش هایی 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.

Archive of SID در این مقاله به منظور تعیین شدت و طیف چشمه های نو ترون حاصل از اندر کنش های مختلف پر تو پرو تون با تالیوم و مس از برنامه کامپیو تری 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 می دهد.

برای اطمینان از صحت محاسبات، آکتیویته محصول بمباران (²⁰¹Pb) با کد ALICE حساب شده و با مقدار بدست آمده از اندازه گیری 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 Berthold نوترون مدل LB6411 ساخت شرکت Berthold [۸] اندازه گیری 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 اندازه گیری 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 اندازه گیری و با یکدیگر مقایسه شد.

۲-۱ محاسبه شدت نوترونهای حاصل از بمباران هدف

برای تعیین شدت نوترون های تولیدی، نیاز به سطح مقطع واکنش های نوترون زا می باشد که بر حسب انرژی پروتون متغیر است. به دلیل تغییر انرژی پروتون ها در عبور از ضخامت هدف



تالیومی و زیرلایه مسی و تغییر سطح مقطع واکنش ها و در نتیجه داشتن شدت های مختلف برای تولید نو ترون، ضخامت لایه های تالیوم و مس را به زیرلایه هایی فرضی تقسیم کرده و به وسیلهٔ برنامه کامپیو تری SRIM توان بازدارندگی تالیوم و مس برای پروتون در هر یک از زیرلایه ها حساب شد. بدین تر تیب که با داشتن انرژی پروتون هنگام ورود به هر زیرلایه (Εi) انرژی پروتون خروجی از آن زیرلایه (Eo) با استفاده از توان بازدارندگی پروتون در انرژی نا در آن زیر لایه "(dE/dX).

$$E_{\circ} = E_i - \left(\frac{dE}{dX}\right)_{E_i} \Delta X \tag{1}$$

با توجه به این که انرژی پروتون خروجی از هر زیر لایه به عنوان انرژی ورودی به زیر لایه بعدی می باشد، تا عمقی از ضخامت مس که پروتون ها متوقف می شوند، 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 انرژی های ورودی و خروجی هر یک از زیرلایه ها، متوسط انرژی ورودی و خروجی پروتون برای محاسبه سطح مقطع تولید نوترون و طیف نوترون ها 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 اندر کنش های 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 ۸MeV 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 dm گزارش شده است. با داشتن سطح مقطع کل تولید نوترون در هر انرژی متوسط، متناظر با زیرلایههای مختلف،

مجله علوم و فنون هستهای، شماره ٤٠ ، ۱۳۸۲ Archive of SID

می توان شدت تولید نو ترون در هر زیرلایه را با استفاده از رابطـه زیر حساب کرد:

$$\mathrm{Sn} = \frac{\rho N_A \sigma I d}{M e} \tag{(Y)}$$

پارامترهای به کار رفته در این رابطه به شرح زیر می باشند: Sn، تعداد نوترون های تولید شده در هر زیرلایه در واحد زمان برحسب s⁻¹ ρ، چگالی عنصر (p_{Cu} =٨/٩٢gr/cm[°] و ρ_{Tl}=٩/٣٢gr/cm[°])، N_A، عدد آوو گادرو برابر ^{۱۰} mole، عدد آ σ، سطح مقطع توليد نوترون در هر زيرلايه برحسب (1. "barn) cm I، شــدت جريـان پروتـونهـاي فـرودي كــه برابـر C/s [°] ۲۰[−] ۲۰ d، ضخامت هر زیر لایه عنصر (برای تالیوم ۳۵۴ و برای مس ۵۰µ) بر حسب cm M، عدد جرمي برحسب gr/mole e، بار الكتريكي الكترون برابر ۲۰⁻۱۰×۱/۶ با جمع نوترونهای ایجاد شده در زیرلایههای تالیوم و زيرلايههاي مس، شدت كل نوترونهاي توليدي در اثر بمباران هدف بدست مي آيد.

۲-۲ محاسبه طیف نوترون های حاصل از بمباران هدف

برای بدست آوردن طیف نوترون های تولیدی از مس و تالیوم، ابتدا سطح مقطعهای میکروسکوپی تولید نوترون به ازای واحد انرژی مربوط به انواع واکنش های نوترون زای 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 ۸MeV، 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 مقطعهای ماکروسکوپی معادل، سطح مقطع در هر بازه در مقدار حورت جداگانه ضرب شد. به این ترتیب طیف نوترونهای حاصل از هریک از مواد تالیوم و مس به صورت جداگانه بدست می آید. برای تعیین طیف کل نوترون های تولیدی، دو مقدار بدست آمده مربوط به مس و تالیوم در هر بازه انرژی نوترونهای تولیدی با یکدیگر جمع می شوند.

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

برای محاسبه نرخ دُز 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 ۳ 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 ۱۵۲۳ بعنوان آشکارساز [۹] در فاصله ۶ متری از هدف، چگالی شار نوترون با بکار بردن تالی F4 در آشکارساز فرضی حساب می شود و با استفاده از ضرایب تبدیل شار نوترون به نرخ دُز معادل [۱۰] میزان آهنگ دز معادل نوترون با استفاده از رابطه (۳) حساب می شود.

$H=\int DF(E)\phi(E)dE \qquad (\mathbf{r})$

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

۲-۴ محاسبه آکتیویتسه ²⁰¹Pb تولیسد شسده از واکسنش ²⁰³Tl(P,3n)²⁰¹Pb

میــزان آکتیویتــه ســرب ۲۰۱ تولیــد شــده از واکــنش ²⁰³Tl(P,3n)²⁰¹Pb را می توان با استفاده از رابطه زیر پیش بینی کرد.

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

در ایسن رابطه، A آکتیویته در مدت اندازه گیری، R نرخ اندر کنش های تولید سرب ۲۰۱، ۸ ثابت واپاشی سرب ۲۰۱، t

Archive of SID مدت بمباران و t فاصله زمانی بین پایان بمباران تا اندازه گیری 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 اندازه گیری

با تقسیم ضخامت هدف تالیوم و زیرلایه مسمی آن به لایه های مختلف، تـوان بازدارنـدگی مـس و تـاليوم بـرای يروتـونهـا بـا استفاده از برنامه SRIM به دست آمد. در جدول ۱ به عنوان نمونه، توان بازدارندگی تالیوم در مورد پروتون برای چندین لايه منظور شده، برحسب ضخامت آورده شده است. همچنين انرژي پروتون ورودي و خروجي براي چندين لايه در نظر گرفته شده برای تالیوم و انرژی متوسط نسبت داده شده به هـر 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 زیرلایه های در نظر گرفته شده برای تالیوم و مس در کد ALICE سطح مقطع تولید نوترون در هر انرژی پروتون تعييـن و شــدت توليـد نـوتــرون در هـر زيرلايـه تعيين شـد. در جدول ۱ سطح مقطع تولید نو ترون 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 تاليوم و در هر ۱۳ زيرلايه فرض شده براي مس حساب شده است. در شکل ۲ شدت تولید نوترون در زیرلایه های فرض شده برای تالیوم نشان داده شده است. در اثر بمباران هدف، در تاليوم ۲/۴۵×۱۰٬۲۸۶ و در مـس ۴/۷۷ بوجـود ۴/۷۷ بوجـود می آید که جمعاً ۱/۲۲×۱۰^{۱۳}n/s در اثر بمباران هدف تولید مي شود.

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	(μ) ضخامت	E _i (MeV)	$\frac{dE}{dX}(\frac{keV}{\mu})$	E₀(MeV)	$\bar{E}=(E_i+E_o)/2$ (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 لایه های مختلف تالیوم (حساب شده با استفاده از کـد کـامپیوتری ALICE) هنگامی کـه پروتـونها بـا انـرژی ۲۸/۵MeV و جریان متوسط ۱۴۵µA بر آن بتابند.

برای اطمینان از صحت محاسبات انجام شده با استفاده از ک.د ALICE آکتیویته پیش بینی شدهٔ ²⁰¹Pb با مقدار اندازه گیری 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 ²⁰¹Pb بــه وســيلهٔ کـورىمتـر CAPINTEC CRC-712 اندازه گیری شد و مقدار آن برابر ۱۳/۱Ci بدست آمد، همچنین با استفاده از سطح مقطع های محاسبه شده با کد ALICE آکتیویته محصول بمباران برابر ۱۳/۵Ci تعیین گردید. لازم به ذکر است، سطح مقطع های بدست آمده از کد ALICE قابل مقایسه با محاسبات و اندازه گیری های انجام گرفته در گذشته بوده است. در شکل های ۳ و ۴ به ترتیب سطح مقطع واكنش توليد ²⁰¹Pb حساب شده با استفاده از كد ALICE، همچنین مقادیر حساب شدهٔ قبلی آورده شده است [۱۱]. همان گونه که در این دو شکل دیده می شود، در محدوده انرژى محاسبات انجام گرفته تطابق نسبتاً قابل قبولي 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 دُز معادل نوترون با استفاده از کد کامپیوتری MCNP در فاصله ۶ متری از هدف استفاده شد و نرخ دُز معادل نوترون در این نقطه برابر ۱۰^۷µSv/hr بدست آمد.



شکل ۳- سطح مقطع تولید نوترونهای حاصل از واکنش Pb(p, 3n)²⁰¹Pb(p, 3n) 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.





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).
- 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).
- 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.
- 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).
- 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).
- EG&G Berthold, "Operating Manual of Neutron Probe LB6411," Id. No. 1-20188-82042 BA2 Rev. No. 01 (1996).
- 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).

همچنین مقدار نرخ در معادل نوترون توسط آشکارساز مدل Berthold در حین بمباران هدف تالیوم با جریان Δμ ۱۴۵ اندازه گیری شد و پس از اعمال ضرایب تصحیح آشکارساز بر اساس طیف انرژی نوترونهای نتیجه شده از کد MCNP برابر Sv/hr با۰×۱۰۲ بدست آمد که در توافق خوبی با مقدار حساب شده است.

۴- بحث و نتیجه گیری

شدت کل نوترونهای تولیدی از هدف تالیوم و زیرلایه مسی جمعاً برابر ۱۰^{۱۳}n/s با۲۲×۲۰۱ بدست آمد. برای اطمینان از صحت محاسبات، آکتیویته Pb²⁰¹ 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 اندازه گیری ۱۳/۱Ci با دستگاه کوریمتر CAPINTEC CRC-712 با CAPINTEC (با دقت حدود دستگاه کوریمتر CAPINTEC CRC-712 (با دقت حدود ۱۰/۰) با توجه به مدلهای محاسباتی و تقریبهای صورت گرفته در برای یکی از واکنشها (واکنش (p,3n)) با مقادیر حساب شده قبلی مقایسه شد، با استناد به محاسبات انجام گرفته توسط دیگران می توان گفت که سطح مقطعهایی که شدت و طیف نوترونها با استفاده از آنها حساب شدهاند دارای دقت بالای هستند [11].

همچنین طیف کل نوترونهای تولیدی در اثر بمباران حساب شد و با استفاده از طیف به دست آمده، نرخ دژ معادل نوترون با استفاده از کد MCNP در فاصله ۶ متری هدف محاسبه و با نتایج اندازه گیری مقایسه گردید که به ترتیب مقادیر اندازه گیری مقایسه گردید که به ترتیب مقادیر اندان 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 اندازه گیری می توان به خطای محاسبات کد ALICE در تعیین شدت و طیف نوترون، خطای محاسبات کد MCNP در محاسبه نرخ دوز معادل نوترون، خطای شبیه سازی هندسه و مواد، خطای تنظیم انرژی پروتون های تولیدی با استفاده از سیکلوترون که در حدود ۲٪ است و خطای آشکار ساز در اندازه گیری نرخ دوز معادل نوترون اشاره کرد.