

تعیین شدت و طیف نوترون‌های به وجود آمده در حین تولید رادیوایزوتوپ ^{18}F

ناهید حاجیلو^{۱*}، سمیه رخشانی^۱، غلامرضا رئیس علی^۱ و سعید حمیدی^۲

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

^۲ دانشگاه اراک، اراک، مرکزی، ایران.

* تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

پست الکترونیکی: nhajiloo@nrcam.org

چکیده

رادیوداروی FDG (18-Fluoro-Deoxy-Glucose) از طریق واکنش $\text{H}_2^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ و گذراندن فرآیند شیمیایی، با استفاده از پروتون‌های با انرژی ۱۷ MeV حاصل از شتابدهنده سیکلوترون Cyclone30 در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تولید می‌شود. شدت نوترون‌های تولیدی در این واکنش و محاسبه طیف آن‌ها به لحاظ ایمنی و به منظور بررسی حفاظ پرتوها ضروری است. در این مقاله با بهره‌گیری از کدهای کامپیوتری SRIM 2003 و ALICE و نیز استفاده از اطلاعات ارائه شده در مراجع، شدت و طیف نوترون‌ها محاسبه شد. به منظور اطمینان از صحت محاسبات انجام شده، حفاظ پرتوها با استفاده از کد کامپیوتری MCNP,4c شبیه‌سازی شد و از نتایج محاسبات مربوط به شدت و طیف نوترون‌ها به عنوان مشخصات چشمه استفاده شد. سپس دز معادل نوترون‌ها در فاصله مشخصی از چشمه محاسبه و با مقدار تجربی مقایسه گردید که تطابق قابل قبولی را نشان داد.

واژگان کلیدی: واکنش $\text{H}_2^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ ، سیکلوترون Cyclone30، کد ALICE، برنامه SRIM، نوترون‌های پر انرژی، حفاظ پرتویی.

۱. مقدمه

های با انرژی ۱۷ MeV که از یک سیکلوترون مدل Cyclone30 به دست می‌آید، بمباران می‌کنند. در این واکنش، آب اکسیژن سنگین به عنوان هدف در داخل استوانه‌ای به عمق ۱۳ mm و قطر ۱۲ mm که نگهدارنده آن استوانه‌ای از جنس نقره به ضخامت ۱۳ mm می‌باشد (شکل ۱)، پنجره این نگهدارنده (window) از جنس تیتانیوم و ضخامت آن ۱۰۰ μm می‌باشد. پرتو پروتون فرودی با انرژی ۱۷ MeV به طور عمود به پنجره تیتانیومی برخورد کرده و سپس وارد آب شده و اندرکنش‌هایی با آب انجام می‌دهد. انرژی باریکه پروتون با

یکی از پرکاربردترین رادیوداروها در مراکز PET^۱ رادیوداروی FDG است. نیمه‌عمر آن ۱۱۰ دقیقه است و به دلیل اینکه یک ترکیب شیمیایی شبیه گلوکز دارد در مطالعات مغز، قلب و آنکولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمول‌ترین روش تولید ^{18}F واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ است. برای تولید این رادیوایزوتوپ در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، آب غنی شده با اکسیژن-۱۸ (H_2^{18}O) با درصد غنای ۹۴٪ را با پروتون-

۲. روش کار

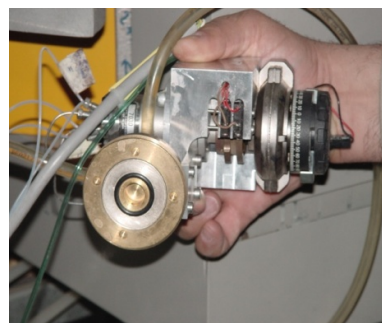
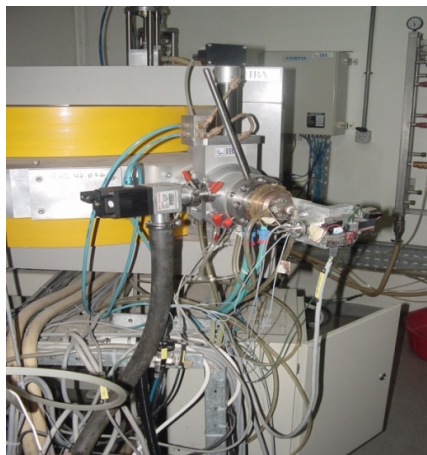
محاسبه شدت نوترون‌های حاصل از اندرکنش پروتون با پنجره تیتانیومی و $H_2^{18}O$ مستلزم آگاهی از سطح مقطع انجام واکنش پروتون با این مواد است. به دلیل متغیر بودن انرژی پروتون در عبور از پنجره تیتانیومی و $H_2^{18}O$ ، نمی‌توان از سطح مقطع واحدی برای محاسبه شدت نوترون‌ها استفاده نمود. کد ALICE قادر است سطح مقطع واکنش‌های قابل انجام را به ازای انرژی پروتون محاسبه نماید. این کد دارای دقت کافی در محاسبه سطح مقطع‌های واکنش پروتون با ^{18}O نمی‌باشد. بنابراین برای محاسبه سطح مقطع واکنش $^{18}O(p,n)^{18}F$ از اطلاعات موجود در TECDOC-1211 استفاده شد، در حالی که برای محاسبه سطح مقطع واکنش پروتون با پنجره تیتانیومی، کدهای کامپیوتری SRIM و ALICE بکار گرفته شد.

۱.۲. محاسبه شدت نوترون‌های تولیدی در اثر بمباران

هدف

برای تولید ^{18}F هدف با باریکه‌ای از پروتون‌های با انرژی ۱۷ MeV بمباران می‌شود، ولی قبل از اینکه پروتون‌ها به آب برسند، با پنجره‌ای از جنس تیتانیم به ضخامت $100 \mu m$ برخورد می‌کنند که از اندرکنش این پروتون‌ها با تیتانیم مقداری نوترون تولید می‌شود. با نفوذ پروتون‌ها به داخل لایه تیتانیم به نسبت عمق نفوذشان از انرژی آن‌ها کاسته می‌شود. لذا در لایه‌های داخلی ترانم‌های تیتانیم با پروتون‌های با انرژی کمتر اندرکنش می‌کنند. سپس پروتون‌ها وارد آب شده و با انجام اندرکنش با آب از انرژی آن‌ها کاسته می‌شود تا پس از پیمودن مسافتی در آن متوقف می‌شوند. بنابراین برای برآورد کل نوترون‌های تولیدی، بایستی اندرکنش توأمان پروتون‌ها با پنجره تیتانیومی و آب، در نظر گرفته شود.

نفوذ در عمق آب کم می‌شود به طوری که پس از پیمودن ضخامت $2/7 \text{ mm}$ در آن متوقف می‌گردد. در این مقاله شدت و طیف نوترون‌های حاصل از اندرکنش پرتو پروتون با هدف $H_2^{18}O$ و پنجره تیتانیومی آن محاسبه شده است. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده و به کار بردن کد کامپیوتری MCNP نرخ دز معادل نوترون‌ها در فاصله معینی از هدف در اتاق بمباران محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شده است. برای محاسبه شدت و طیف نوترون‌های حاصل از واکنش $^{18}O(p,n)^{18}F$ از سطح مقطع‌های ارائه شده در [۱] TECDOC-1211 استفاده شده است و نیز به منظور تعیین شدت و طیف چشمه نوترون حاصل از اندرکنش‌های مختلف پرتو پروتون با پنجره تیتانیومی از کدهای کامپیوتری [۲] SRIM و [۳] ALICE استفاده شده است.



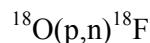
شکل (۱): الف) موقعیت هدف تولید ^{18}F در اتاق تولید. ب) استوانه

هدف در تولید ^{18}F .

$$\text{شدت تولید نوترون} = \frac{\rho N_A I d \sigma}{Me} \quad (۳)$$

که ρ چگالی عنصر؛ N_A عدد آووگادرو برابر $10^{23} \text{ mole}^{-1}$ ؛ I شدت 7.02 ؛ σ سطح مقطع انجام واکنش برحسب cm^2 ؛ d ضخامت هر لایه بر جریان پروتون‌های فرودی برابر $5 \mu\text{A}$ ؛ M عدد جرمی برحسب gr/mole و e بار الکتریکی الکترون برابر $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

۳.۲. محاسبه شدت نوترون‌های حاصل از واکنش



همان‌گونه که گفته شد پروتون‌ها پس از پیمودن ضخامت پنجره تیتانیومی وارد آب می‌شوند. به دلیل اینکه کد ALICE دقت کافی در محاسبه سطح مقطع واکنش پروتون با اتم اکسیژن-۱۸ را ندارد، بنابراین برای محاسبه شدت نوترون‌های تولیدی در آب از اطلاعات موجود در مراجع استفاده شد. در TECDOC-1211 برای واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ سطح مقطع هایی در انرژی‌های مختلف داده شده است که با متوسط‌گیری از آن‌ها با توجه به بازه‌ی انرژی پروتون‌ها در هدف H_2^{18}O (بین ۰ تا ۱۶ MeV) و قرار دادن آن در رابطه (۳) شدت نوترون حاصل از بمباران H_2^{18}O با پروتون به‌دست می‌آید. با توجه به اینکه واکنش تولید نوترون با ^{18}O انجام می‌گیرد و 0.9 کل هدف را ^{18}O تشکیل می‌دهد (با در نظر داشتن غنای H_2^{18}O و نیز نسبت وزنی اکسیژن ۱۸ نسبت به کل هدف) لذا در رابطه (۳) چگالی مربوط به ^{18}O در نظر گرفته شده است.

۴.۲. محاسبه طیف نوترون‌های حاصل از بمباران هدف

برای به‌دست آوردن طیف نوترون‌های تولیدی از پنجره تیتانیومی در 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 مربوط به پنجره تیتانیومی، با یکدیگر جمع زده شدند تا سطح مقطع میکروسکوپی دیفرانسیلی معادل

۲.۲. محاسبه شدت نوترون‌های حاصل از اندرکنش

پروتون با پنجره تیتانیومی هدف تولید ^{18}F

برای تعیین شدت نوترون‌های تولیدی، پنجره تیتانیومی به 10 زیر لایه تقسیم شده و با محاسبه توان بازدارندگی تیتانیم برای پروتون dE/dX ، انرژی متوسط پروتون در هر زیر لایه به‌دست آمد. بدین ترتیب که با تقسیم ضخامت هدف به لایه‌های مساوی، پرتابه با انرژی E_i وارد هر پهنای شده و با انرژی E_0 از آن خارج می‌شود. در این صورت انرژی پرتابه خروجی از هر پهنای برابر خواهد بود با:

$$E_0 = E_i - (dE/dX)_{E_i} \Delta X \quad (۱)$$

به‌عنوان یک تقریب، محاسبه dE/dX به جای اینکه به ازای انرژی پرتابه در وسط پهنای ΔX انجام شود در انرژی ورودی E_i محاسبه شده است:

$$E_{av} = \frac{E_i + E_0}{2} \quad (۲)$$

پس از مشخص شدن متوسط انرژی پروتون در هر لایه، برای محاسبه سطح مقطع تولید نوترون در هر زیر لایه از کد ALICE استفاده شد. بدین ترتیب که با وارد کردن متوسط انرژی پروتون در هر زیر لایه در این کد، سطح مقطع تولید نوترون حاصل از تمامی اندرکنش‌های ممکن پروتون با تیتانیم به ازای هر انرژی متوسط پروتون در هر لایه و نیز طیف انرژی نوترون‌ها در هر زیر لایه در خروجی کد ALICE گزارش می‌شود. در خروجی این کد، در بازه‌های مختلف انرژی‌های خروجی که پهنای آن برابر 0.5 MeV انتخاب شده است، سطح مقطع‌های نوترون‌های تولیدی به ازای واحد انرژی نوترون خروجی بر حسب mb/MeV و در انتها سطح مقطع کل تولید نوترون بر حسب mb بصورت جداگانه گزارش شده است. با داشتن سطح مقطع کل تولید نوترون در هر انرژی متوسط، متناظر با زیر لایه‌های مختلف، شدت تولید نوترون در هر زیر لایه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

۶.۲. اندازه گیری نرخ دز معادل نوترون در فاصله معینی

از چشمه

نرخ دز معادل نوترون در فاصله ۲/۷ متری از چشمه پرتوها با استفاده از یک آشکارساز نوترون مدل LB6411 ساخت شرکت Berthold [۶] اندازه گیری شد. اندازه گیری ها در جریان ۱ μA انجام شد و سپس در جریان متوسط ۸/۵ μA که جریان عملیاتی می باشد، بهنجار شده است. آشکارساز در یک بازه زمانی مشخص شده میزان نوترون های تولید شده را اندازه گیری کرده و میانگین آن را بر حسب cps (count per second) نمایش می دهد. آشکارساز LB6411 براساس بیناب چشمه نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ کالیبره شده و باید مقادیر اندازه گیری شده توسط آن را بر اساس ضرایب کالیبراسیون ارائه شده در کاتالوگ دستگاه (N فاکتور کالیبراسیون در انرژی En) تصحیح نمود. با توجه به طیف شار نوترون ها در محل متناظر با موقعیت اندازه گیری که از کد MCNP به دست می آید می توان ضرایب کالیبراسیون را به درستی اعمال کرد.

ضریب تصحیح برای هر موقعیت اندازه گیری a از رابطه زیر به دست می آید:

$$N(a) = \frac{\sum_g \varphi_g(a) \times N_g}{\sum_g \varphi_g(a)} \quad (۴)$$

که در آن N_g ضریب کالیبراسیون هر گروه انرژی (برحسب $\mu\text{Sv}/(\text{h} \times \text{CPS})$) و φ_g شار در هر گروه انرژی نوترون می باشد. بنابراین با داشتن مقادیر $N(a)$ نرخ دز معادل نوترون اندازه گیری شده توسط آشکارساز با اعمال ضرایب تصحیح در محل اندازه گیری برابر است با:

$$\text{CPSD}(a) = N(a) \times (\text{تعداد نوترون قرائت شده}) \quad (۵)$$

مربوط به هر بازه انرژی، با پهنای ۰/۵ MeV به دست آمد. سپس برای تعیین سطح مقطع های ماکروسکوپی معادل، سطح مقطع در هر بازه در مقدار pd/M به عنوان ضریب وزنی هسته های موجود ضرب شد. به این ترتیب طیف نوترون های حاصل از هریک از زیر لایه های تیتانیوم به دست آمد. همان گونه که گفته شد، برای محاسبه سطح مقطع های واکنش اکسیژن-۱۸ نمی توان از کد ALICE استفاده کرد، بنابراین از طیف نوترون های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ که در تحقیق انجام گرفته توسط بوسکو [۴] ارائه شده است، استفاده شد. طیف کل نوترون های حاصل از هدف تولید ^{18}F از جمع طیف مربوط به پنجره تیتانیومی و طیف نوترون های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ به دست آمد.

۵.۲. محاسبه دز معادل نوترون در فاصله معینی از

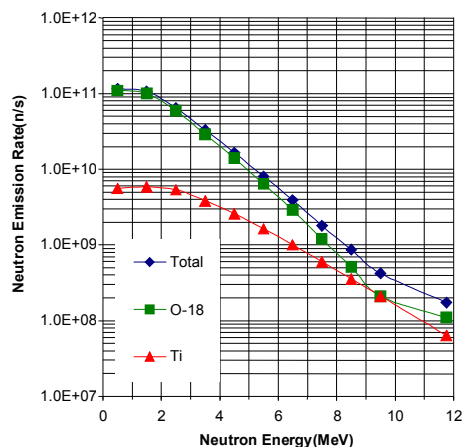
چشمه با استفاده از کد MCNP

با تعریف هندسه اتاق تولید ^{18}F و راهرو مربوطه و معرفی مواد تشکیل دهنده حفاظ که بتون معمولی با چگالی $2/35 \text{ gr}/\text{cm}^3$ است و استفاده از طیف نوترون های به دست آمده از بمباران هدف، فایل ورودی کد MCNP [۵] تهیه شد. همچنین هدف آب و نگهدارنده آن که از جنس نقره بوده و اطراف آن را لایه ای از جنس برنج در بر گرفته است و نیز در قسمت جلو آن دیسک هایی از جنس استیل و آلومینیم به ترتیب به ضخامت ۵ و ۲ سانتی متر و در پشت هدف یک لایه از جنس برنز به ضخامت ۳ سانتی متر وجود دارد (شکل ۱) که در شبیه سازی منظور شده اند. چشمه نیز به صورت همسانگرد نقطه ای، درون آب تعریف شد. آشکارساز فرضی کروی از جنس هوا و به شعاع ۱۵ cm در فاصله ۲/۷ متری از چشمه، در فایل ورودی در نظر گرفته شد و میزان شار نوترون در این نقطه با استفاده از تالی F4 محاسبه گردید که با وارد کردن ضرایب تبدیل شار به دز [۶] در فایل ورودی نرخ دز معادل نوترون در محل مذکور محاسبه شد.

جدول (۲): سطح مقطع و شدت تولید نوترون حاصل از اندرکنش پروتون با جریان $8/5 \mu\text{A}$ با زیر لایه های مختلف تیتانیومی (محاسبه شده با استفاده از کد ALICE)

انرژی (MeV)	سطح مقطع تولید نوترون (mb)	تعداد کل نوترون در هر لایه
۱۶/۱	۸۱۶	$5/36 \times 10^6$
۱۶/۲	۸۱۵	$5/35 \times 10^6$
۱۶/۳	۸۱۴	$5/35 \times 10^6$
۱۶/۴	۸۳۲	$5/47 \times 10^6$
۱۶/۵	۸۳۲	$5/47 \times 10^6$
۱۶/۶	۹۰۰	$5/91 \times 10^6$
۱۶/۷	۸۴۳	$5/54 \times 10^6$
۱۶/۸	۸۴۶	$5/54 \times 10^6$
۱۶/۹	۸۳۵	$5/49 \times 10^6$
۱۷/۰	۸۷۶	$5/75 \times 10^6$

برای محاسبه طیف نوترون‌های حاصل از پنجره تیتانیومی هدف تولید ^{18}F مانند گذشته از کد ALICE استفاده شد. اما چون برای اکسیژن-۱۸ نمی‌توان از کد ALICE استفاده کرد از طیف نوترون‌های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ که در تحقیق انجام گرفته توسط بوسکو [۴] ارائه شده، استفاده شد. در نتیجه طیف کل نوترون‌های حاصل از هدف تولید ^{18}F از جمع طیف مربوط به پنجره تیتانیومی و طیف نوترون‌های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ در بازه‌های انرژی متناظر، به‌دست آمد. در شکل (۲) طیف نوترون‌های حاصل پنجره تیتانیومی، آب و کل هدف آمده است.



شکل (۲): طیف نوترون‌های حاصل از کل هدف تولید ^{18}F .

که در آن D نرخ دز معادل نوترون در مکان a برحسب $\mu\text{Sv/h}$ است.

۳. نتایج محاسبات و اندازه‌گیری

به منظور تعیین شدت نوترون‌های تولیدی در تیتانیم، پنجره تیتانیومی به ۱۰ زیر لایه تقسیم شده و با محاسبه توان بازدارندگی تیتانیم برای پروتون dE/dX ، انرژی متوسط پروتون در هر زیر لایه به‌دست آمد که نتایج در جدول (۱) آمده است. سپس با وارد کردن متوسط انرژی پروتون در هر زیر لایه در کد ALICE، سطح مقطع تولید نوترون از تمامی اندرکنش‌های ممکن پروتون با تیتانیم به‌دست آمد. با بکار بردن این سطح مقطع‌ها در رابطه (۳) شدت تولید نوترون در هر لایه تیتانیم مطابق جدول (۲) محاسبه شد. سپس با استفاده از سطح مقطع‌های موجود در 1211TECDOC- در بازه انرژی پروتون بین ۰ تا ۱۶ MeV (انرژی پروتون‌ها در هدف آب) شدت نوترون‌های حاصل از واکنش پروتون با اکسیژن-۱۸ محاسبه شد. از جمع شدت نوترون‌های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ و نیز پنجره تیتانیومی شدت کل نوترون‌های حاصل از اندرکنش پروتون با هدف ^{18}F محاسبه شد که این مقادیر به ترتیب برابر هستند با: $6/90 \times 10^{11} \text{ n/s}$ ، $5/52 \times 10^{11} \text{ n/s}$ و $1/24 \times 10^{11}$.

جدول (۱): ضخامت هر زیر لایه، توان بازدارندگی، انرژی ورودی، خروجی و متوسط انرژی در هر زیر لایه برای پنجره تیتانیومی (محاسبه

شده با برنامه SRIM 2003)

ردیف	ضخامت (μ)	E_i (MeV)	dE/dX (keV/ μ)	E_o (MeV)	E_{av} (MeV)
۱	۰-۱۰	۱۷/۰۰	۸/۹۳۳	۱۶/۹۱	۱۶/۹۵
۲	۱۰-۲۰	۱۶/۹۱	۸/۹۷۱	۱۶/۸۲	۱۶/۸۶
۳	۲۰-۳۰	۱۶/۸۲	۹/۰۰۹	۱۶/۷۳	۱۶/۷۵
۴	۳۰-۴۰	۱۶/۷۳	۹/۰۴۸	۱۶/۶۴	۱۶/۶۸
۵	۴۰-۵۰	۱۶/۶۴	۹/۰۸۶	۱۶/۵۵	۱۶/۵۹
۶	۵۰-۶۰	۱۶/۵۵	۹/۱۲۴	۱۶/۴۶	۱۶/۵۰
۷	۶۰-۷۰	۱۶/۴۶	۹/۱۶۳	۱۶/۳۷	۱۶/۴۱
۸	۷۰-۸۰	۱۶/۳۷	۹/۲۰۲	۱۶/۲۷	۱۶/۳۲
۹	۸۰-۹۰	۱۶/۲۷	۹/۲۴۱	۱۶/۱۸	۱۶/۲۳
۱۰	۹۰-۱۰۰	۱۶/۱۸	۹/۲۸۱	۱۶/۰۶	۱۶/۱۲

دست آمد. جهت اطمینان از صحت نتایج محاسبات شدت و طیف نوترون‌ها، نرخ دز معادل نوترون با استفاده از کد MCNP در فاصله ۲/۷ متری از چشمه با استفاده از شدت و طیف محاسبه شده برای نوترون‌ها، محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شد. نتایج بدست آمده اختلافی برابر ۹/۲ درصد را نشان می‌دهند. از عوامل و منابع خطای محاسبات و اندازه‌گیری می‌توان به خطای محاسبات کد ALICE در تعیین شدت و طیف نوترون، خطای محاسبات کد MCNP در محاسبه نرخ دز معادل نوترون و خطای آشکارساز در اندازه‌گیری نرخ دز معادل نوترون اشاره کرد.

۵. سپاسگزاری

از همکاری صمیمانه گروه کارگردانی سیکلوترون پژوهشکده کاربرد پرتوها به‌ویژه آقای مهندس غلامرضا اصلانی که در انجام این پژوهش ما را یاری نمودند، کمال تشکر را داریم.

در پایان برای بررسی صحت محاسبات انجام شده، با شبیه سازی مسئله توسط کد کامپیوتری MCNP دز معادل نوترون در فاصله ۲/۷ متری از هدف محاسبه و با نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری با دزیتر نوترون مقایسه شد. مقادیر مربوط به شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به ترتیب عبارتند از: 323 mSv/h و 663 mSv/h که اختلافی برابر ۹/۲٪ را نشان می‌دهند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

شدت کل نوترون‌های تولیدی از هدف H_2^{18}O و پنجره تیتانیومی جمعاً برابر $1/24 \times 10^{11} \text{ n/s}$ به دست آمد. طیف نوترون‌های حاصل از پنجره تیتانیومی با استفاده از سطح مقطع‌های محاسبه شده با کد ALICE برآورد گردید. از طیف نوترون‌های حاصل از واکنش پروتون با H_2^{18}O که توسط سایر پژوهشگران محاسبه شده، استفاده گردید [۴]. طیف کل نوترون‌های حاصل از بمباران هدف، با جمع طیف نوترون‌های حاصل از واکنش پروتون‌ها با پنجره تیتانیومی و نیز طیف نوترون‌های تولیدی از واکنش پروتون‌ها با $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ به

۶. مراجع

- [1] International Atomic Energy Agency. Charged Particle Cross-Section Database for Medical Radioisotope Production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions. Report IAEA-TECDOC-1211 (2001).
- [2] J. F. Ziegler and J. P. Biersack. SRIM (2003). <http://www.SRIM.org>.
- [3] M. Blann, J. Bisplinghoff. Code ALICE / Livermore 82. Report UCID-19614. Lawrence Livermore National Laboratory. CA (1982).
- [4] A. Bosko. General Electric Pettrace Cyclotron as A Neutron Source For Boron Neutron Capture Therapy. Texas University, (2005) 54.
- [5] 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).
- [6] EG&G Berthold. Operating Manual Neutron Probe LB6411. Id. No. 1-20188-82042 BA2 Rev. No. 01. (1996).