

محاسبه و اندازه گیری توزیع دز پرتوهای جویبارش شده در حفاظ اتاقک هدف تولید ^{18}F

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

۱- سازمان انرژی اتمی ایران-پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۲- دانشگاه اراک، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده

رادیوداروی $[^{18}\text{F}]FDG(18\text{-Fluoro-Deoxy-Glucose})$ از طریق واکنش $H_2^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ با استفاده از پروتون های با انرژی 17 MeV حاصل از یک شتابدهنده سیکلوترون Cyclone30 در مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته ای سازمان انرژی اتمی ایران (کرج) تولید می شود. در این مقاله با محاسبه شدت تولید نوترون و شناسایی طیف نوترون ها، ویژگی های حفاظ و تجهیزات موجود، مقدار دز پرتو نفوذی از حفاظ اتاقک هدف تولید ^{18}F تعیین شده است.

برای محاسبه شدت و طیف نوترون های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ از سطح مقطع های ارائه شده در TECDOC-1211 استفاده شده است. با توجه به اینکه پروتون ها در برخورد با پنجره تیتانیومی هدف نیز مقداری نوترون تولید می کنند، شدت نوترون های حاصل از اندرکنش پروتون با پنجره تیتانیومی با استفاده از برنامه کامپیوتری SRIM 2003 و کد ALICE محاسبه شد. سپس با استفاده از شدت و طیف نوترون ها با شبیه سازی اتاقک هدف تولید ^{18}F ، با استفاده از کد کامپیوتری MCNP نرخ دز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو اتاقک هدف محاسبه شد.

شدت کل نوترون حاصل از واکنش پروتون با اکسیژن ۱۸ و لایه تیتانیوم $10^{11} \times 1/24\text{ n/s}$ محاسبه شد. با استفاده از کد کامپیوتری MCNP نرخ دز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو اتاقک هدف تولید ^{18}F محاسبه و با مقادیر اندازه گیری شده در جریان پرتونی $1/5\text{ }\mu\text{A}$ مقایسه شد.

واژه های کلیدی: ^{18}F ، حفاظ، توزیع دز، کد ALICE، برنامه SRIM، کد MCNP

۱- مقدمه

FDG با نیمه عمر ۱۱۰ دقیقه پرکاربردترین رادیو دارو در مراکز PET است. معمول ترین روش تولید ^{18}F واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ است. برای تولید این رادیودارو در پژوهشگاه تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی سازمان انرژی اتمی ایران (کرج) آب غنی شده با ^{18}O ($H_2^{18}\text{O}$) با درصد غنای ۹۴٪ با پروتون های با انرژی 17 MeV که از یک سیکلوترون مدل Cyclone30 بدست می آید بمباران می شود. در این واکنش هدف، استوانه ای از جنس نقره است به عمق 13 mm و قطر داخلی 12 mm و قطر خارجی 25 mm که حاوی آب غنی شده است، که پنجره ای از جنس تیتانیوم به ضخامت $100\text{ }\mu\text{m}$ آنرا مسدود کرده است. پرتو پروتون ورودی با انرژی 17 MeV به طور عمود به پنجره تیتانیومی برخورد کرده و سپس وارد آب می شود. انرژی باریکه پروتون با نفوذ در عمق آب کم می شود

پست الکترونیک: raisali@yahoo.com و graisali@aeoi.org.ir

بطوریکه پس از پیمودن ضخامت $2/7$ mm در آن متوقف می‌گردد. در این مقاله شدت و طیف نوترون های حاصل از اندرکنش پرتو پروتون با هدف $H_2^{18}O$ و پنجره تیتانیومی آن محاسبه شده و با استفاده از نتایج بدست آمده و به کار بردن کد کامپیوتری MCNP [۱] نرخ دز معادل نوترون های جویبارش شده (streaming) در نقاط مختلف راهرو اتاقک هدف تولید ^{18}F محاسبه و با نتایج اندازه گیری مقایسه شده است. برای محاسبه شدت و طیف نوترون های حاصل از واکنش $^{18}O(p,n)^{18}F$ از سطح مقطع های ارائه شده در TECDOC-1211 [۲] استفاده شده است و نیز به منظور تعیین شدت و طیف چشمه نوترون حاصل از اندرکنش های مختلف پرتو پروتون با پنجره تیتانیومی از برنامه کامپیوتری SRIM [۳] و کد ALICE [۴] استفاده شده است.

۲- روش کار

برای محاسبه شدت نوترون های حاصل از اندرکنش پروتون با پنجره تیتانیومی و $H_2^{18}O$ نیاز به سطح مقطع انجام واکنش پروتون با این مواد می باشد. کد ALICE قادر است سطح مقطع واکنشهای قابل انجام را به اِزاء انرژی پرتو پروتون محاسبه نماید. ولی بدلیل اینکه ^{18}O یک ایزوتوپ جادویی است، کد ALICE دارای دقت کافی در محاسبه سطح مقطع های واکنش پروتون با ^{18}O نمی باشد. بنابراین در مورد سطح مقطع واکنش $^{18}O(p,n)^{18}F$ از اطلاعات موجود در TECDOC-1211 استفاده شده است، در حالیکه برای محاسبه سطح مقطع واکنش پروتون با پنجره تیتانیومی از برنامه کامپیوتری SRIM و کد ALICE استفاده نموده ایم.

۲-۱- محاسبه شدت نوترون های حاصل از اندرکنش پروتون با پنجره تیتانیومی

برای تولید ^{18}F هدف با باریکه ای از پروتون های با انرژی 17 MeV بمباران می شود، ولی قبل از اینکه پروتون ها وارد آب شوند با پنجره ای از جنس تیتانیوم به ضخامت $100 \mu m$ برخورد می کنند که از اندرکنش این پروتون ها با تیتانیم مقداری نوترون تولید می شود. با نفوذ پروتونها به داخل لایه تیتانیم به نسبت عمق نفوذشان از انرژی آنها کاسته می شود. لذا در لایه های داخلی تر اتمهای تیتانیم با پروتونهای با انرژی کمتر اندرکنش می کنند، در نتیجه برای تعیین شدت نوترونهای تولیدی، پنجره تیتانیومی به 10 زیر لایه تقسیم شده و با محاسبه توان بازدارندگی تیتانیوم برای پروتون dE/dX ، انرژی متوسط پروتون در هر زیر لایه بدست آمد. بدین ترتیب که با تقسیم ضخامت هدف به لایه های مساوی، پرتابه با انرژی E_i وارد هر پهنای شده و با انرژی E_0 از آن خارج می شود. در این صورت انرژی پرتابه خروجی از هر پهنای خواهد بود با:

$$E_0 = E_i - (dE/dX)_{E_i} \Delta X \quad (1)$$

انرژی متوسط مربوط به پهنای مورد نظر از رابطه (۲) محاسبه شده است.

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

پس از مشخص شدن متوسط انرژی پروتون در هر لایه و وارد کردن آن در کد ALICE سطح مقطع تولید نوترون در هر لایه بدست می آید. بدین ترتیب با داشتن سطح مقطع کل تولید نوترون (بر حسب mb) در هر انرژی متوسط شدت تولید نوترون در هر لایه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$(3) \quad \text{شدت تولید نوترون در هر زیر لایه} = \frac{\rho N_A I d \sigma}{Me}$$

که پارامترهای بکاررفته در این رابطه به شرح زیر می باشند:

ρ ، چگالی ماده (برای تیتانیوم $\rho = 4.52 \text{ gr/cm}^3$)

N_A ، عدد آووگادرو برابر $6.02 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

σ ، سطح مقطع انجام واکنش بر حسب cm^2

I ، شدت جریان پروتون های فرودی که برابر $8 \mu\text{A}$ است.

d ، ضخامت هر لایه بر حسب cm

M ، عدد جرمی بر حسب gr/mole (برای تیتانیوم ۲۲)

e ، بار الکتریکی الکترون برابر $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

۲-۲- محاسبه شدت نوترون های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$

در TECDOC-1211 برای واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ سطح مقطع هایی در انرژی های مختلف داده شده است که با متوسط گیری از آنها با توجه به بازه انرژی پروتون ها در هدف H_2^{18}O (بین ۱۶ MeV تا ۰) و قرار دادن آن در رابطه (۳) شدت نوترون حاصل از بمباران H_2^{18}O با پروتون بدست می آید. چون واکنش تولید نوترون با ^{18}O انجام می گیرد و ۰/۹ جرم هر مولکول آب غنی شده را ^{18}O تشکیل می دهد، با در نظر گرفتن ۹۴٪ غنای H_2^{18}O چگالی ^{18}O برابر 846 gr/cm^3 محاسبه شده است. مقادیر d و $\bar{\sigma}$ نیز به ترتیب برابر با $2700 \mu\text{m}$ و $170/5 \text{ mb}$ در نظر گرفته شده اند

۲-۳- محاسبه دز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو 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 3 gr/cm^3 است و استفاده از طیف نوترون های تولید شده، فایل ورودی کد MCNP تهیه شد. لازم بذکر است که طیف کل نوترون های تولید شده، مجموع طیف نوترون های حاصل از تیتانیوم و نیز طیف نوترون های حاصل از واکنش $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ [۵] است که در جدول ۱ آمده است. همچنین هدف که استوانه ای از جنس نقره حاوی آب غنی شده می باشد و اطراف آن را لایه ای از جنس برنز در بر گرفته است و نیز در قسمت جلو آن دیسک هایی از جنس استیل و آلومینیوم به ترتیب به ضخامت های ۵ و ۲ سانتیمتر و در پشت هدف یک لایه از جنس برونز به ضخامت ۳ سانتیمتر وجود دارد، در شبیه سازی منظور شده اند. و نیز چشمه را بصورت نقطه ای درون آب تعریف کردیم. آشکارساز های فرضی کروی از جنس هوا و به شعاع 15 cm در ۱۱ نقطه مختلف راهرو در فایل ورودی در نظر گرفته شد و میزان شار نوترون در این نقاط با استفاده از تالی F4 محاسبه گردید و با وارد کردن ضرایب تبدیل شار به دز [۶] در فایل ورودی میزان دز معادل نوترون در نقاط مذکور محاسبه شد.

۲-۴- اندازه‌گیری دز نوترون در نقاط مختلف راهرو

شار نوترون در نقاط مختلف راهرو با استفاده از یک آشکارساز نوترون مدل LB6411 اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها به منظور کاهش پرتوگیری در جریان $1 \mu A$ انجام شد و سپس در جریان متوسط $8/5 \mu A$ ، که جریان عملیاتی می‌باشد، بهنجار شده است. برای صحت اندازه‌گیری‌ها و جلوگیری از اثرات انعکاس پرتوها از دیوارها، آشکارسازها را درست در وسط راهرو و به ارتفاع میانگین ارتفاع بدن انسان بر روی یک چهار پایه قرار دادیم. آشکارساز در یک بازه زمانی مشخص شده شار نوترون‌های تولید شده را اندازه‌گیری کرده و میانگین آن را بر حسب تعداد متوسط شمارش در هر ثانیه نمایش می‌دهد که بازه‌های زمانی طوری انتخاب شدند که خطای اندازه‌گیری کمتر از ۵ درصد باشد. آشکارساز LB6411 براساس بیناب چشمه نوترونی کالیفرنیم-۲۵۲ کالیبره شده و باید مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن را بر اساس ضرایب کالیبراسیون ارائه شده در کاتالوگ دستگاه تصحیح نمود. با توجه به طیف شار نوترون‌ها در محل‌های متناظر با موقعیت‌های اندازه‌گیری که با استفاده از کد MCNP بدست می‌آید، می‌توان ضرایب کالیبراسیون را به درستی اعمال کرد. ضریب تصحیح برای هر موقعیت اندازه‌گیری a از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$N(a) = \frac{\sum_g \varphi_g(a) \times N_g}{\sum_g \varphi_g(a)} \quad (4)$$

که در آن: N_g ، ضریب کالیبراسیون هر گروه انرژی (برحسب $\mu Sv/(h * CPS)$) و φ_g شار در هر گروه انرژی نوترون می‌باشد. بنابراین با داشتن مقادیر $N(a)$ ، دز معادل نوترون‌های اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز با اعمال ضرایب تصحیح در هر محل اندازه‌گیری برابر است با:

$$D(a) = N(a) \times \text{تعداد نوترون قرائت شده (CPS)} \quad (5)$$

که در آن D نرخ دز معادل نوترون در مکان a بر حسب $\mu Sv/h$ است.

۳- نتایج محاسبات و اندازه‌گیری

همانطور که قبلاً ذکر شد برای تعیین شدت نوترون‌های تولیدی در تیتانیوم، ضخامت پنجره تیتانیومی به 10 زیر لایه تقسیم شد. با محاسبه توان بازدارنگی تیتانیوم برای پروتون، انرژی متوسط پروتون در هر زیر لایه بدست آمد. سپس با وارد کردن متوسط انرژی پروتون در هر زیر لایه در کد ALICE، سطح مقطع تولید نوترون از تمامی اندرکنش‌های ممکن پروتون با تیتانیوم بدست آمد و در نتیجه مشخص گردید که حدود $5/5 \times 10^{11} \text{ n/s}$ در پنجره تیتانیومی تولید می‌شود. سپس با استفاده از سطح مقطع‌های موجود در TECDOC-1211 شدت نوترون‌های حاصل از واکنش پروتون با اکسیژن 18 برابر $6/9 \times 10^{11} \text{ n/s}$ محاسبه شد. با شبیه‌سازی مسئله توسط کد کامپیوتری دز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو محاسبه گردید و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده در هنگام بمباران هدف با پروتون‌های با انرژی 17 MeV و جریان متوسط $8/5 \mu A$ که در جدول ۲ آمده است، مقایسه شد. این مقایسه بصورت نمودار در شکل ۱ نشان داده شده است. خطای محاسبات MCNP زیر ۵ درصد می‌باشد

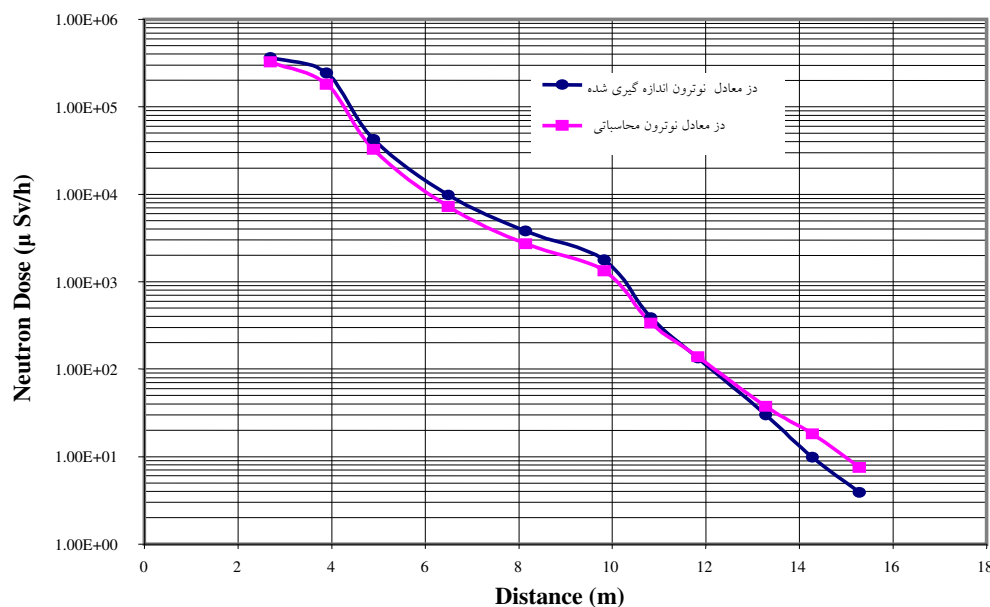
جدول ۱- طیف نوترون های تولید شده از ^{18}O و نیز طیف کل

| طیف کل (n/s) | طیف نوترون های حاصل از ^{18}O (n/s) | طیف نوترون های حاصل از Ti (n/s) | انرژی (MeV) |
|--------------|--|---------------------------------|-------------|
| 1.16E+11 | 1.10E+11 | 5.6E+09 | 0.5 |
| 1.06E+11 | 1.00E+11 | 5.89E+09 | 1.5 |
| 6.44E+10 | 5.90E+10 | 5.36E+09 | 2.5 |
| 3.29E+10 | 2.90E+10 | 3.86E+09 | 3.5 |
| 1.66E+10 | 1.40E+10 | 2.59E+09 | 4.5 |
| 8.04E+09 | 6.40E+09 | 1.64E+09 | 5.5 |
| 3.91E+09 | 2.90E+09 | 1.01E+09 | 6.5 |
| 1.80E+09 | 1.20E+09 | 6.04E+08 | 7.5 |
| 8.68E+08 | 5.10E+08 | 3.58E+08 | 8.5 |
| 4.22E+08 | 2.10E+08 | 2.12E+08 | 9.5 |
| 1.74E+08 | 1.10E+08 | 64264849 | 11.75 |

جدول ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده شار نوترون در نقاط مختلف راهرو اتاق تولید FDG در هنگام بمباران هدف با پروتون‌های با انرژی

۱۷ MeV و جریان متوسط $8/5 \mu\text{A}$

| فاصله آشکار ساز از چشمه (m) | شار نوترون قرائت شده (CPS) | ضرایب کالیبراسیون در هر موقعیت اندازه گیری | دز معادل نوترون ($\mu\text{Sv/h}$) |
|-----------------------------|----------------------------|--|--------------------------------------|
| 2.7 | 2.61e+5 | 1.40 | 3.66e+5 |
| 3.9 | 1.69e+5 | 1.43 | 2.42e+5 |
| 4.9 | 2.74e+4 | 1.54 | 4.23e+4 |
| 6.5 | 6.10e+3 | 1.61 | 9.82e+3 |
| 8.15 | 2.29e+3 | 1.65 | 3.77e+3 |
| 9.83 | 1.07e+3 | 1.65 | 1.77e+3 |
| 10.83 | 2.25e+2 | 1.72 | 3.87e+2 |
| 11.83 | 7.73e+1 | 1.73 | 1.33e+2 |
| 13.28 | 1.70e+1 | 1.78 | 3.00e+1 |
| 14.28 | 5.52e+0 | 1.77 | 9.77e+0 |
| 15.28 | 2.10e+0 | 1.81 | 3.89e+0 |



شکل ۱- مقایسه دز معادل نوترون محاسبه شده با استفاده از کد MCNP با نتایج حاصل از اندازه‌گیری در حین بمباران هدف ^{18}O با پروتون های ۱۷ MeV و جریان $8/5 \mu\text{A}$.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

شدت کل نوترون‌های تولیدی از هدف $H_2^{18}O$ و پنجره تیتانیومی جمعاً برابر $1/24 \times 10^{11}$ n/s بدست آمد. که با مقادیر محاسبه شده توسط شیو و همکاران [۷] کاملاً توافق دارد. با استفاده از شدت و طیف محاسبه شده برای نوترون‌ها نرخ دز معادل نوترون‌های جویبارش شده، با استفاده از کد MCNP در فواصل مختلف از چشمه محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شد. این نتایج در نه نقطه ابتدایی اختلافی زیر ۲۸ درصد و در دو نقطه آخر که بیشترین مقدار خطا را داریم اختلافی حدود دو برابر را نشان می‌دهد. با توجه به بحث حفاظ‌سازی و عوامل خطای موجود، نتایج قابل قبول است. 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.

سپاسگزاری

برخود لازم می‌دانیم از آقایان دکتر محمد میرزائی مهندس غلامرضا اصلانی و مهندس مهدی اخلاقی و دیگر دوستانی که در این کار ما را یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمائیم.

مراجع

- 1- 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).
- 2-International Atomic Energy Agency, "Charged Particle Crosss-Section Database for Medical Radioisotope Production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions", Report IAEA-TECDOC-1211 (Vienna: IAEA) (2001).
- 3- J. F. Ziegler and J. P. Biersack, " SRIM 2003. 20", <http://www.SRIM.org>.
- 4- M.Blann , J.Bisplinghoff , " Code ALICE / Livermore 82", Report UCID-19614, Lawrence Livermore National Laboratory , CA (1982).
- 5-A.Bosko, "General Electric Pettrace Cyclotron As A Neutron Source For Boron Neutron Capture Therapy", Texas University, page 54 (August 2005).
- 6- EG&G Berthold; "Operating Manual Neutron Probe LB6411", Id. No. 1-20188-82042 BA2 Rev. No. 01, (1996).
- 7- R.D. Sheu, C.C Chen, R. J. Sheu, C.H. Kao and S.H. Jian "The Refined Shielding Design For The Cyclotron Room Of The Buddhist Tzu Chi General Hospital", Radiatin Dosimetry, Vol, 115, No. 1-4, pp. 216-221 (2005).