



## همانندسازی جویبارش نوترون‌ها در راهرو حفاظ اتاق هدف تالیوم سیکلوترون "Cyclone 30" با استفاده از کد کامپیوتری MCNP

غلامرضا رئیس‌علی<sup>۱\*</sup>، ناهید حاجیلو<sup>۱</sup>، سعید حمیدی<sup>۲</sup>، غلامرضا اسلانی<sup>۱</sup>

۱- مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج-ایران  
۲- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، صندوق پستی: ۳۸۱۵۶-۸۷۹، اراک-ایران

**چکیده:** رادیوداروی تالیوم-۲۰۱ از واکنش  $^{201}\text{Pb} (p, 3n) ^{201}\text{Tl}$  به وسیله پروتون‌های حاصل از شتابدهنده سیکلوترون در مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران تولید می‌شود. در این کار پژوهشی، با در نظر گرفتن هندسه و حفاظ اتاق هدف تالیوم و راهروهای آن، مشخصات چشمه نوترون با بکارگیری روش‌های کاستن واریانس انشقاق و رولت روسی، جویبارش پرتوهای نوترون به هنگام بمباران هدف تالیوم با پروتون‌های  $28.5 \text{ MeV}$  و جریان  $145 \mu\text{A}$ ، با استفاده از کد مونت کارلوی MCNP همانندسازی و نرخ دُز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو حساب شده و نتایج با اندازه‌گیری تجربی ارزیابی شده‌اند. مقدار نرخ دُز معادل نوترون حساب شده در محل ورودی راهرو اتاق هدف جامد برابر  $93 \mu\text{Sv/hr}$  و مقدار اندازه‌گیری شده آن پس از اعمال ضرایب کالیبره کردن دُزیمتر بر اساس طیف بدست آمده نوترون‌ها برابر  $136 \mu\text{Sv/hr}$  بدست آمده است که به لحاظ حفاظ‌سازی، توافق نسبتاً خوبی با مقدار اندازه‌گیری شده دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تالیوم-۲۰۱، حفاظ پرتوها، نوترون‌های برگشتی، روش مونت کارلو، کد MCNP، جاری شدن تابش، شبیه‌سازی کامپیوتری، cyclone 30

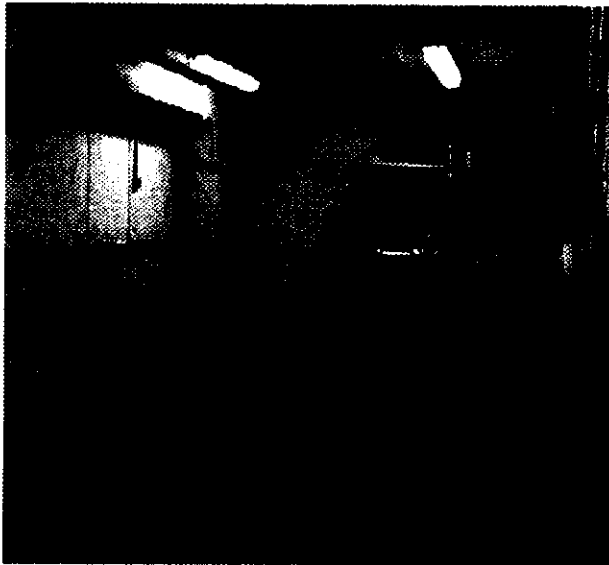
## Simulation of Neutron Streaming through Labyrinth of the Shield of Thallium Target Room of Cyclotron "Cyclone 30" using MCNP Computer Code

G. Raisali<sup>1\*</sup>, N. Hajilo<sup>1</sup>, S. Hamidi<sup>2</sup>, G. Aslani<sup>1</sup>

1- Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine, AEOI, P.O. Box: 31485 - 498, Karaj - Iran  
2- Physics Dpt., Faculty of Science, Arak University, P.O. Box: 38156 - 879, Arak - Iran

**Abstract:** Thallium-201 is one of the medical radioisotopes produced in Nuclear Research Center for Agriculture and Medicine via  $^{203}\text{Tl} (p, 3n) ^{201}\text{Pb}$  reaction, using protons from cyclotron Cyclone 30. Due to high intensity of the neutrons produced from the thallium target and its copper substrate, protection against this radiation is a necessity. The radiation shield is the concrete walls of the target room accessible from outside through a multi-bend maze. In this work, we have calculated the streaming of neutrons through the maze of the target room using MCNP Monte Carlo radiation transport code. The target has been bombarded with  $145 \mu\text{A}$  of  $28.5 \text{ MeV}$  protons. Equivalent dose rate of neutrons in various positions in the maze has been calculated and compared with the measured values. The maximum deviation between the calculated and measured values is found to occur at the farthest position from the source, namely at the entrance door of the maze, for which the neutron equivalent dose has been calculated as  $93 \mu\text{Sv/hr}$  and the corrected measured value upon using the energy spectrum weighted correction factor is  $136 \mu\text{Sv/hr}$ . These values are in good agreement with each other according to the shielding point of view.

**Keywords:** thallium-201, radiation shield, backscattered neutrons, monte carlo method, MCNP code, radiation streaming, computer simulation, cyclone 30



شکل ۱- اتاق هدف جامد

## ۱- مقدمه

رادبوداروی  $^{131}\text{I}$ ، که در تصویربرداری از میوکارد برای تشخیص بیماری‌های کرونر قلب و انفارکتوس میوکارد بکار می‌رود، در مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران تولید می‌شود.

برای تولید این رادبودارو، ایزوتوپ  $^{131}\text{I}$  در این مرکز تحت تابش پرتو پروتون با انرژی  $28.5 \text{ MeV}$  که در سیکلوترون مدل "Cyclone 30" تولید می‌شود، قرار می‌گیرد. این ایزوتوپ، ابتدا از طریق واکنش  $(p, 3n)$  تبدیل به  $^{208}\text{Pb}$  با نیمه عمر  $9/4$  ساعت می‌شود، سپس به  $^{131}\text{I}$  با نیمه عمر  $73/1$  ساعت، تبدیل می‌گردد. محل بمباران هدف تالیومی (اتاق هدف جامد)، در شکل ۱ نشان داده شده است. به دلیل بالا بودن شدت نوترون‌های تولیدی در اثر واکنش‌های مختلف پروتون با هدف تالیوم و زیرلایه مسی آن، حفاظت در مقابل آنها اجتناب‌ناپذیر است. حفاظ این پرتوها اتاقی با دیوارهای بتونی است که از یک راهرو چند خم به بیرون راه می‌یابد. طراحی این حفاظ به گونه‌ای باید باشد که دُز پرتوهایی که از طریق راهرو به بیرون گسیل می‌شوند، کمتر از حد تعیین شده باشد. در حین بمباران هدف تالیومی، در اثر اندرکنش پروتون با هدف تالیومی و زیرلایه مسی آن، علاوه بر محصول موردنظر، پرتوهای مختلفی از جمله نوترون‌ها به مقدار زیاد ایجاد می‌شوند که به سبب داشتن انرژی زیاد و سطح مقطع اندک، از دیدگاه حفاظ‌سازی اهمیت زیاد دارند.

به دلیل اهمیت پرتوهای گسیل شده در راهرو (Maze) اتاقک‌های پرتودهی و لزوم حفاظت در برابر این پرتوها، در گذشته کارهای متعددی در این زمینه انجام شده است. در سال ۱۹۸۲، K. Tesch و همکارانش، مقدار نشت دُز معادل نوترون از راهرو حفاظت یک سیکلوترون را اندازه‌گیری کردند [۱]. Masukawa و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۲ با استفاده از گُد DUCT-III پرتوهای نوترون گسیل شده با انرژی حدود  $1 \text{ GeV}$  در یک راهرو اتاق پرتودهی را حساب کردند [۲].

در این کار پژوهشی، برای تعیین میزان پرتو خروجی از راهرو اتاق هدف جامد (شکل ۲) سعی شده است، با استفاده از گُد MCNP4C، دُز معادل ناشی از گسیل پرتوهای نوترون به هنگام بمباران هدف تالیوم در این راهرو محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شود.

## ۲- حفاظ پرتوها و هندسه اتاقک هدف و راهرو آن

مناسب‌ترین مواد برای حفاظ‌سازی در برابر نوترون‌های پُرانرژی، ترکیبی از عناصر سنگین و سبک هستند؛ زیرا عناصر سنگین با پراکندگی ناکشسان باعث کاهش انرژی نوترون‌ها می‌شوند، اما عناصر سبک با پراکندگی کشسان و جذب بیشتر نوترون‌های کُند، باعث کاهش انرژی و شار نوترون‌ها می‌گردند. بتون با داشتن ترکیبی از هر دو گونه، این عناصر و قیمت ارزان، حفاظ مناسبی در برابر نوترون‌ها است. حفاظ پرتو در اتاق هدف جامد نیز از جنس بتون معمولی با چگالی  $2/35 \text{ gr/cm}^3$  است که ضخامت آن در سقف و کف اتاق،  $50 \text{ cm}$  و در دیوارها، بسته به موقعیت دیوار بین یک تا دو متر می‌باشد.

برای ورود و خروج به هنگام لزوم و حمل تجهیزات به اتاق هدف جامد، وجود یک در ورودی لازم است، اما از این در، ممکن است مقدار قابل توجهی پرتو به بیرون نشت کند. برای جلوگیری از این نشت راهروی تعیبه شده که دیوارهای آن از بتون معمولی به ضخامت یک متر است. وجود این راهرو موجب گسیل پرتوها به سوی خارج از اتاق هدف می‌شود؛ اما با طراحی مناسب راهرو، مقدار دُز در اثر پراکندگی متوالی و جذب پرتوها در حفاظ بتونی، در ورودی راهرو ممکن است به کمتر از حد مجاز کاهش یابد. میزان جذب پرتوها در راهرو بستگی به شکل، ابعاد و تعداد خم‌های آن دارد [۳]. در شکل ۲ طرح و ابعاد اتاق هدف جامد به همراه حفاظ و راهرو چند خم آن نشان داده شده است.



راهرویی به طول ۱۰ متر متشکل از دو دیوار موازی بتونی با چگالی  $2.35 \text{ gr/cm}^3$ ، به فاصله یک متر از یکدیگر و باریک‌های از نوترون‌ها با انرژی مشخص که با زاویه ۴۵ درجه، در یک انتهای راهرو به یکی از دو دیوار تابیده شود، در نظر گرفته شد. در انتهای دیگر راهرو با بکار بردن تالی F4 [۴] (که شار متوسط ذرات درون سلول را با استفاده از طول مسیرشان حساب می‌کند)، شار نوترون‌ها با استفاده از کد MCNP حساب شد و با استفاده از ضرایب تبدیل شار به نرخ دُز [۵]، نرخ دُز معادل از رابطه (۱) بدست آمد:

$$D = \sum_{i=1}^N \phi_i F_i \quad (1)$$

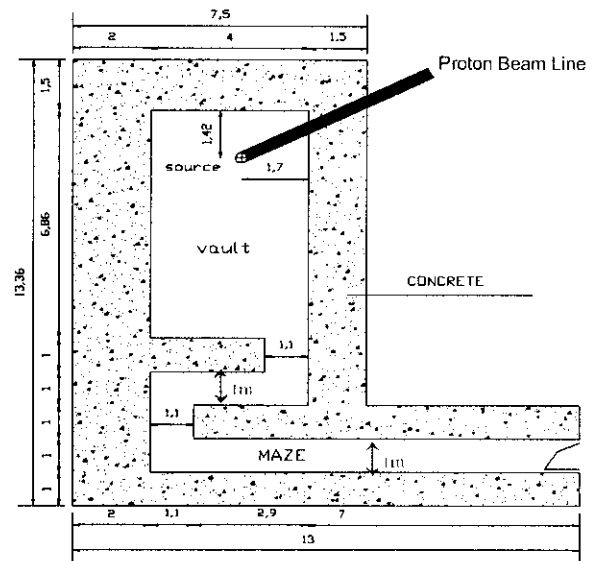
که در آن D نرخ دُز معادل، N تعداد گروه‌های انرژی،  $\phi_i$  شار نوترون در هر گروه انرژی و  $F_i$  ضریب تبدیل شار نوترون‌ها به نرخ دُز معادل است.

این محاسبات برای دیوارهایی به ضخامت‌های ۳، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و برای چند انرژی چشمه نوترون ( $0.025 \text{ eV}$ ،  $100 \text{ keV}$ ،  $1 \text{ MeV}$  و  $2 \text{ MeV}$ ) تکرار شد. با این محاسبات می‌توان ضخامت مناسب برای تأثیرگذاری نوترون‌های برگشتی بر میزان دُز معادل را تخمین زد.

از نتایج حاصل از این محاسبات، در مواردی که فقط بازتابش نوترون مورد نظر بوده، در تعریف هندسه اتاق هدف جامد و راهروهای مربوط به آن در کد MCNP استفاده شده است، تا در حد امکان مدت اجرای محاسبات کوتاه‌تر شود. بدیهی است در مواردی که عبور پرتوها نیز مورد توجه قرار داشته یا در پاسخ مورد نظر مؤثر بوده است، مانند دیوارهای داخلی، ضخامت واقعی دیوارها، در نظر گرفته شده و نتایج بدست آمده در بخش ۴ آورده شده است.

### ۳-۲ محاسبه نرخ دُز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو با استفاده از کد MCNP

در فایل ورودی کد MCNP، باید کلیه اطلاعات مربوط به هندسه اتاق هدف، ابعاد راهروها، ضخامت دیوارها، مواد تشکیل‌دهنده حفاظ، شدت چشمه و طیف آن معرفی شوند. بدین منظور، با مشخص کردن هندسه اتاق هدف جامد و راهرو مربوط



شکل ۲- شکل هندسی و ابعاد حفاظ اتاق هدف جامد و راهروهای مربوط به آن (برحسب متر)

### ۳- روش محاسبه

ضخامت حفاظ بتونی اتاق هدف جامد، بطوری که در شکل ۲ نشان داده شده، بین یک تا دو متر است که به دلیل ضخامت زیاد حفاظ بتونی و بزرگ بودن ابعاد هندسی اتاق هدف و راهرو آن موجب طولانی شدن مدت اجرای برنامه‌های شبیه‌سازی آن به وسیله کد MCNP<sup>(۱)</sup> خواهد شد. در این روش محاسبه با استفاده از طریقه کاستن واریانس مناسب و ساده‌سازی هندسه مسئله، سعی شده است، تا حد امکان مدت اجرای محاسبات کاسته شود. ضخامت حفاظ بتونی نیز در حدی در نظر گرفته شده است که در آن تأثیر نوترون‌های برگشتی در اثر پراکندگی به خوبی منظور شده و ضخامت‌های بیشتر از آن تأثیر چندانی در تعداد نوترون‌های بازتابشی نداشته باشد. سپس با شبیه‌سازی ترابرد و جویبارش نوترون‌ها با استفاده از کد MCNP، نرخ دُز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو اتاق هدف جامد محاسبه و با مقدار تجربی آن، که به وسیله آشکارساز نوترون مدل LB6411 ساخت شرکت Berthold اندازه‌گیری شده، مقایسه گردیده است.

### ۱-۳ محاسبه تأثیر ضخامت دیوار بتونی بر میزان نوترون‌های برگشتی

برای بررسی تأثیر ضخامت حفاظ بتونی بر میزان پرتوهای نوترون پراکنده شده، به این ترتیب عمل شد:



|     |     |      |                           |      |     |     |
|-----|-----|------|---------------------------|------|-----|-----|
| 256 | 512 | 1024 | 1024<br>1024              | 1024 | 512 | 256 |
| 128 | 256 | 512  | 512<br>512                | 512  | 256 | 128 |
| 64  | 128 | 256  | 256<br>به سمت خروجی راهرو | 256  | 128 | 64  |

شکل ۳- تقسیم‌بندی قسمتی از هندسه حفاظ واقع در ابتدای راهرو و ضرایب اهمیت نسبت داده شده به آن

لازم به یادآوری است که تعداد تاریخچه‌های دنبال شده (nps)<sup>(۲)</sup> برای محاسبه با کُد MCNP طوری در نظر گرفته شده است که خطای محاسبه همواره کمتر از ۱۰٪ شود. برای محاسبه شار و نرخ دُز معادل نوترون، برنامه فایل ورودی برای حدود ۷ میلیون تاریخچه ذرات به مدت ۴ هزار دقیقه بر روی یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با سرعت ۱/۸۳ GHz اجرا شد.

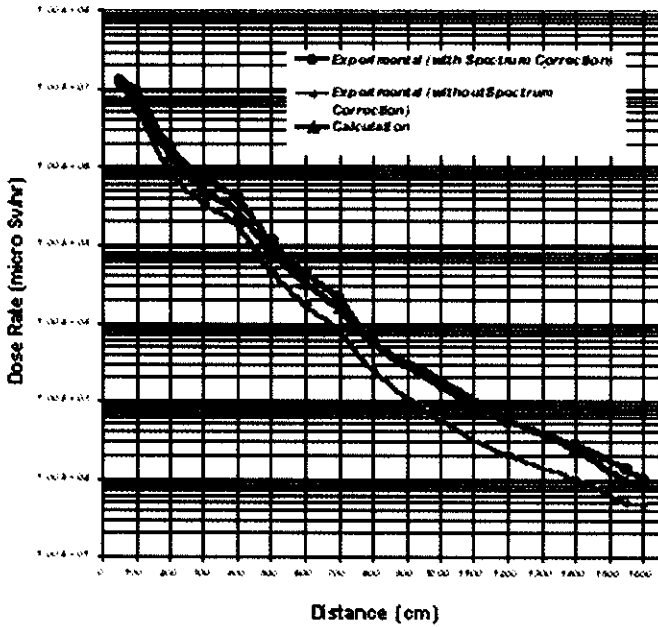
#### ۴- نتایج محاسبات

با بررسی تأثیر ضخامت دیوار بتونی بر میزان نوترون‌های برگشتی، ضخامت کافی دیوار برای در نظر گرفتن نرخ دُز معادل نوترون‌های بازتابیده از روی آن، با توجه به شکل ۴، برابر ۳۰cm بدست آمد. لذا برای کاستن از مدت زمان اجرای برنامه از MCNP ضخامت بدست آمده در محاسبات نرخ دُز معادل نوترون (۳۰cm) استفاده شد. چگالی شار نوترون در گروه‌های مختلف انرژی نوترون در سه نقطه نزدیک به چشمه، یک نقطه میانی و ورودی راهرو که با استفاده از کد MCNP محاسبه شده، در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که با دور شدن از چشمه و نزدیک شدن به در خروجی راهرو، شار نوترون‌های تند نسبت به شار نوترون‌های کند کاهش می‌یابد. نرخ دُز معادل نوترون حساب شده در نقاط مختلف راهرو در شکل ۶ نشان داده شده است.

به آن (طبق شکل ۲)، مواد تشکیل دهنده حفاظ که بتون معمولی با چگالی  $2/35 \text{ gr/cm}^3$  می‌باشد و با در نظر گرفتن یک چشمه نوترون نقطه‌ای و همسانگرد به شدت  $10^{13} \times 1/22 \text{ n/s}$  و با طیف معین، فایل ورودی کُد MCNP تهیه شد [۶]. به سبب احتاط شدن هدف تالیومی با قاب‌های آلومینیومی به ضخامت‌های مختلف در محل بمباران، چشمه را در مرکز یک پوسته کروی آلومینیومی به شعاع ۸ cm و به ضخامت ۲/۵ cm (که تقریباً برابر ضخامت متوسط قاب‌های آلومینیومی پیرامون آن است) در نظر گرفته‌ایم.

برای محاسبه شار و دُز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو، از آشکارسازهای فرضی ثبت شار به صورت کره‌های هوا به شعاع ۱۵ cm استفاده شده و با استفاده از رابطه (۱)، شار و نرخ دُز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو حساب شده است.

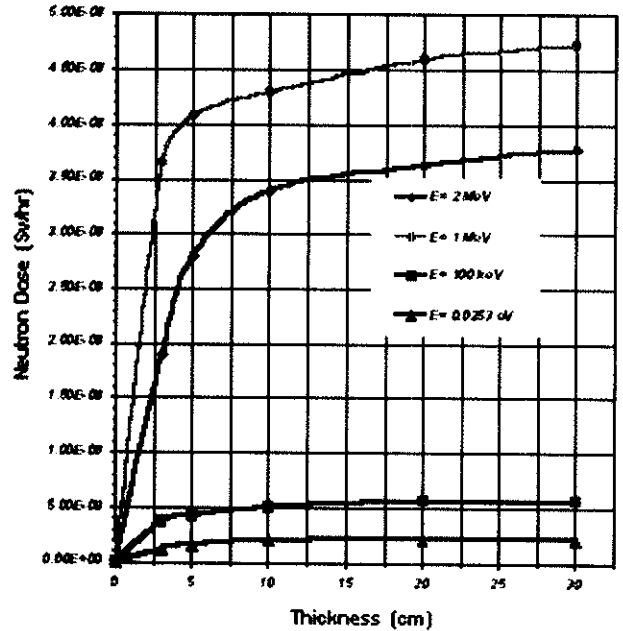
برای کاستن خطای محاسبات کُد MCNP و کاستن زمان اجرای محاسبات، می‌توان از روشهای مختلف کاهش واریانس استفاده کرد، و روش مورد استفاده در این کار روش رولت روسی و انشقاق ذرات است. برای اجرای این روش، هندسه اتاق هدف جامد و راهرو آن را به سلولهایی تقسیم کرده و به هر سلول درون راهرو، ضریب اهمیتی متناسب با فاصله آن از چشمه، نسبت داده‌ایم، به این ترتیب که با دور شدن از چشمه ضریب اهمیت بزرگتری به سلول نسبت داده شده است. با بکارگیری این روش، مدت اجرای محاسبات چندین برابر کاسته شد. در شکل ۳، هندسه قسمتی از راهرو اتاق هدف تالیوم نشان داده شده است. بطوری که مشاهده می‌شود با تقسیم این هندسه به سلولهای مختلف، به هر سلول ضریب اهمیتی نسبت داده شده است که با نزدیک شدن به محل در ورودی راهرو افزایش می‌یابد تا با تکثیر مجازی نوترون‌ها در طول راهرو، خطای محاسبات در انتهای راهرو کاهش یابد. همچنین در مورد دیوارهای دو طرف راهرو، ضریب‌های اهمیت به گونه‌ای تعیین شده‌اند که سلول‌های عمقی (دور از سطح داخلی دیوار) از اهمیت کمتری برخوردارند. با این تدابیر، تعداد ذرات بازتابیده از دیوار و ذرات گسیل شده درون راهرو از لحاظ آماری با فاصله گرفتن از چشمه، تقویت می‌شوند و با تنظیم این ضرایب اهمیت، توانستیم دُز ناشی از نوترون‌ها را در تمام طول راهرو با دقت کافی حساب کنیم.



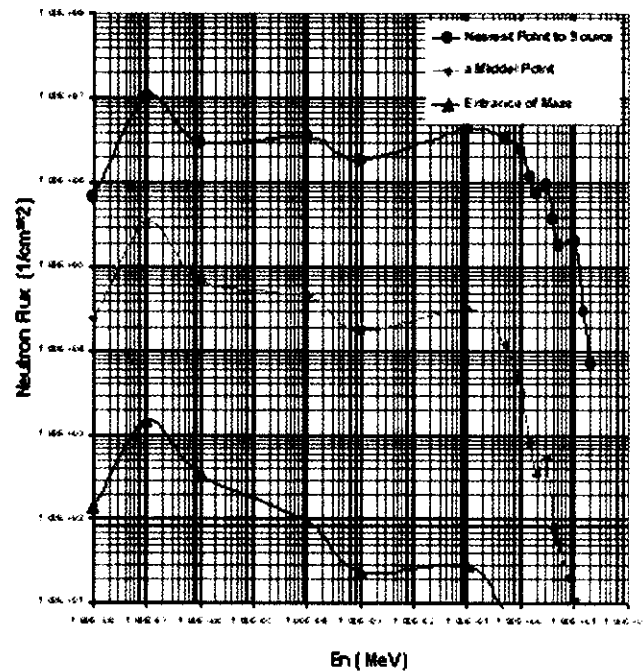
شکل ۶- مقایسه نرخ دز حساب شده به وسیله کُد MCNP با نتایج حاصل از اندازه‌گیری، با اعمال ضرایب تصحیح و بدون اعمال آنها

### ۵- روش اندازه‌گیری نرخ دز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو اتاق هدف جامد و محدودیت‌های آن

برای اطمینان از درستی محاسبات به وسیله کُد MCNP، نرخ دز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو با آشکارساز نوترون مدل LB6411 ساخت شرکت Berthold اندازه‌گیری شد [۷]. چون نرخ دز در ابتدای راهرو، به سبب نزدیک بودن به چشمه بالاتر از بیشینه دز در محدوده اندازه‌گیری با آشکارساز است، نمی‌توان در جریان‌های شدید پروتون، که منجر به تولید تعداد زیادی نوترون می‌شود، از این آشکارساز برای اندازه‌گیری دز نوترون‌ها استفاده کرد. بنابراین، برای جلوگیری از رسیدن به حالت اشباع، اندازه‌گیری‌ها در جریان  $3 \mu A$  انجام گرفت و نرخ دز معادل برای جریان عملیات  $145 \mu A$  به‌نجار شد. به منظور اجتناب از پرتوگیری در اندازه‌گیری‌های مکرر، به هنگام اندازه‌گیری دز از دوربین مدار بسته‌ای استفاده شد که بر روی صفحه نمایش آشکارساز تنظیم شده بود و با مونتئوری که خارج از محل اندازه‌گیری کار گذاشته شده بود، خواندن مقادیر اندازه‌گیری روی این صفحه میسر گردید. اندازه‌گیری‌ها درست در وسط راهرو در ارتفاع  $100$  سانتی‌متری با استفاده از یک پایه چرخدار صورت گرفت. به علت بالا بودن شدت پرتوها در ابتدای راهرو (نزدیک به چشمه)، در مدت کوتاهی میسر بود با



شکل ۴- نمودار تغییرات دز ناشی از چشمه نوترون با انرژی‌های مختلف که در مقابل دو دیوار بتونی قرار گرفته است برحسب ضخامت‌های مختلف دو دیوار (حساب شده با استفاده از کُد MCNP)



شکل ۵- چگالی شار نوترون در گروه‌های انرژی در نظر گرفته شده در سه نقطه نزدیک به چشمه، میانی و ورودی راهرو، هنگام بمباران هدف تالیوم با پروتون‌های  $28/0$  MeV و جریان  $145 \mu A$  که به وسیله کُد MCNP حساب شده است.



نرخ دُز اندازه‌گیری شده به وسیله آشکارساز را در هر محل اندازه‌گیری با استفاده از رابطه (۳) بدست آورد:

$$D(a)_{\text{corrected}} = F(a) D(a)_{\text{noncorrected}} \quad (3)$$

که در آن  $D(a)_{\text{corrected}}$  نرخ دُز معادل نوترون در مکان  $a$  با اعمال ضریب تصحیح و  $D(a)_{\text{noncorrected}}$  مقدار نشان داده شده توسط دُزیمتر بدون اعمال ضریب تصحیح است.

### ۶- مقایسه نتایج محاسبات با نتایج حاصل از اندازه‌گیری

در شکل ۶ نرخ دُز معادل نوترون حساب شده با استفاده از کُد MCNP و نتایج حاصل از اندازه‌گیری با آشکارساز نوترون قبل و بعد از اعمال ضرایب تصحیح نشان داده شده‌اند.

به عنوان نمونه، در نزدیکترین نقطه داخل راهرو نسبت به چشمه، در یک نقطه میانی و در انتهای راهرو، مقادیر نرخ دُز حساب شده به ترتیب برابر  $1.05 \times 10^7 \mu\text{Sv/hr}$ ،  $1.58 \times 10^4 \mu\text{Sv/hr}$  و  $93 \mu\text{Sv/hr}$  و مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر  $1.28 \times 10^7 \mu\text{Sv/hr}$ ،  $1.13 \times 10^4 \mu\text{Sv/hr}$  و  $136 \mu\text{Sv/hr}$  می‌باشند، که به ترتیب نشان‌دهنده اختلافی برابر ۲۲٪، ۳۴٪ و ۴۵٪ بین نتایج محاسبه و اندازه‌گیری است.

### ۷- نتیجه‌گیری

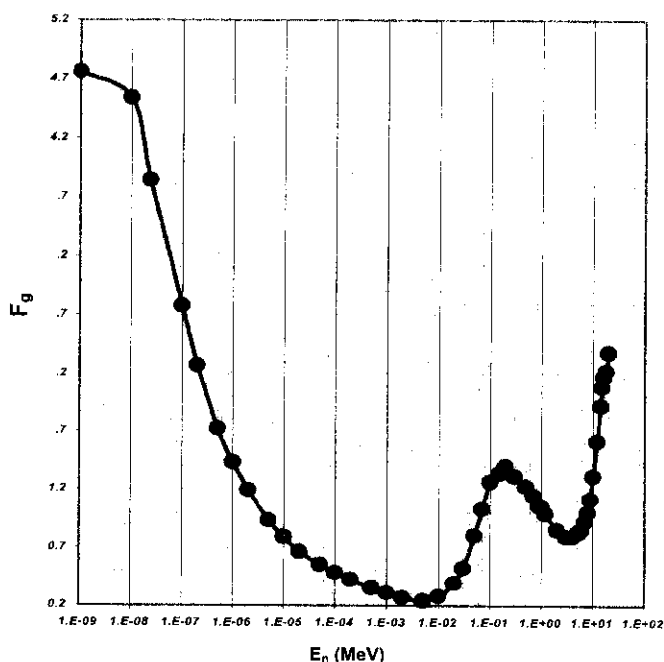
بطوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با دور شدن از چشمه مولد نوترون، ضمن کاهش چگالی شار نوترون‌ها، تعداد نوترون‌های پراکنده نیز کاسته شده و تعداد نوترون‌های کم‌انرژی افزوده می‌شود که نشان‌دهنده کاهش انرژی نوترون‌ها در اثر پراکندگی‌های متوالی است. نرخ دُز معادل نوترون در نقاط مختلف راهرو حساب و با نتایج اندازه‌گیری پس از اعمال ضرایب تصحیح و بدون اعمال آنها مقایسه شده است. بطوری که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با دور شدن از چشمه، در امتداد راهرو از نرخ دُز معادل نوترون کاسته می‌شود. همچنین با عبور از هر پیچ، شیب نمودار تغییر کرده و کاهش شدیدی در نرخ دُز پدیدار می‌گردد. با توجه به این نمودار، روند تغییرات نتایج حساب شده و اندازه‌گیری شده یکسان است. همچنین به لحاظ مقادیر عددی نیز با توجه به شکل ۶، بین نتایج حساب شده و

آشکارساز اندازه‌گیری نسبتاً دقیقی انجام گیرد، اما با دور شدن از چشمه پرتوها و کاهش شدت آنها، برای داشتن آمار شمارش کافی، مدت طولانی‌تری لازم بود تا اندازه‌گیری قابل قبولی انجام شود. با توجه به مدت انتخاب شده برای هر وضعیت اندازه‌گیری و خطای ذاتی آشکارساز، خطای کل در اندازه‌گیری‌ها کمتر از ۱۰٪ برآورد شده است.

از طرفی، با توجه به اینکه آشکارساز مورد استفاده براساس طیف چشمه نوترونی کالیفرنوم-۲۵۲ کالیبره شده بود، می‌بایست مقادیر اندازه‌گیری شده با آن را در ضرایب تصحیح مندرج در کاتالوگ دستگاه ضرب کرد. با توجه به اینکه این ضرایب بر حسب طیف انرژی نوترون‌های سهم در ایجاد شار در نقاط مختلف اندازه‌گیری متفاوتند (شکل ۷)، بنابراین با استفاده از طیف انرژی نوترون‌ها (حساب شده توسط کُد MCNP)، ضریب تصحیح برای هر وضعیت اندازه‌گیری  $a$  از رابطه (۲) حساب شد:

$$F(a) = \frac{\sum F_g \phi_g(a)}{\sum \phi_g(a)} \quad (2)$$

که در آن  $F(a)$  ضریب تصحیح در وضعیت  $a$ ،  $F_g$  ضریب کالیبراسیون هر گروه انرژی و  $\phi_g(a)$  شار در هر گروه انرژی  $g$  در وضعیت  $a$  می‌باشد. بنابراین با داشتن مقادیر  $F(a)$  می‌توان



شکل ۷- نمودار ضریب تصحیح آشکارساز LB6411 بر حسب انرژی‌های مختلف نوترون [۶].



## References:

1. K. Tesch, "The attenuation of the neutron dose equivalent in a labyrinth through an accelerator shield," *Particle Accelerators* **12**, 169-175 (1982).
2. F. Masukawa, "Analyses of high energy neutron streaming experiments using DUCT-III," *Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement2*, 1268-1271 (2002).
3. Bhaskar Mukherjee and Simon Parcell; "Transmission of neutron and gamma Radiation field along the maze of a cyclotron vault" *Appl. Radiat. Isot.* **48** (4), 453-457 (1997).
4. J. F. Briesmeister; "N-Particle Transport Code," Version 4A. Manual LA-12625-M (1993).
5. NCRP, "American National Standard," NCRP Report 33. ANSI / ANS-6.1.1 (1977).
6. غلامرضا رئیس‌علی، سعید حمیدی، ناهید حاجیلو، غلامرضا اصلانی، "تعیین شدت و بیناب نوترون‌های حاصل از بیماران ۲۸/۵،" مجموعه MeV هدف تالیوم با زیرلایه مسی با پروتون‌های مقالات دهمین گردهمایی فیزیک‌دانان و متخصصان هسته‌ای کشور، دانشگاه اراک، ۱۴۰-۱۴۶ (اسفند ماه ۱۳۸۲).
7. EG&G Berthold, "Operating Manual Neutron Probe LB6411" Id. No. 1-20188-82042 BA2 Rev. No. **01** (1996).

اندازه‌گیری شده با اعمال ضرایب تصحیح، تطابق نسبتاً خوبی وجود داشته و اختلاف آنها بین ۲۰٪ تا ۴۵٪ است، و از دیدگاه حفاظت‌سازی که هدف این تحقیق می‌باشد، تطابق مناسبی است. برطبق این شکل، نتایج حاصل از محاسبه و اندازه‌گیری بدون اعمال ضرایب در ابتدای راهرو که نزدیک به چشمه است، تفاوت کمتری دارند ولی با دور شدن از چشمه بر اختلاف آنها افزوده می‌شود. اما پس از اعمال ضرایب تصحیح، فاصله دو منحنی در کلیه نقاط مورد اندازه‌گیری و محاسبه، اختلاف نسبی تقریباً یکسان دارند. این بدان معنی است که در ابتدای راهرو ضریب تصحیح بدست آمده برای نقاط اندازه‌گیری کوچکتر است، ولی با دور شدن از چشمه ضریب تصحیح بزرگتری بدست می‌آید. این مقدار در اولین و آخرین وضعیت اندازه‌گیری به ترتیب برابر ۱/۷ و ۲/۷ می‌باشد و چون برای اعمال این ضرایب از طیف حساب شده توسط کُد MCNP در هر نقطه متناظر با اندازه‌گیری استفاده شده است، این تطابق می‌تواند نشان‌دهنده قابل قبول بودن طیف حساب شده به وسیله این کُد باشد.

## تشکر و قدردانی

وظیفه خود می‌دانیم از آقای ارژنگ شهور و خانم الهام شاه‌حسینی به خاطر همکاری‌های صمیمانه آنان در انجام این تحقیق تشکر نمایم. همچنین از سرکار خانم لیلا محرمی‌نژاد، که در تایپ و حروفچینی این مقاله دقت و کوشش زیاد کرده‌اند، سپاسگزاریم.

## پی‌نوشت‌ها:

۱- MCNP: Monte Carlo N Particles

۲- nps: number of particles