



بهینه‌سازی طول و جرم مخروط سایه به منظور تعیین سهم دز پرتوهای پراکنده شده در آزمایشگاه کالیبراسیون میدان نوترون چشمه Am/Be

غلامرضا رئیس‌علی^{۱*}، سعید حمیدی^۲، احسان حلاج‌فرد^۳، ارژنگ شاهور^۱، ناهید حاجیلو^۱

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

۲- پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

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

چکیده: تکنیک مخروط سایه یکی از روشهای برآورد سهم پرتوهای پراکنده به هنگام کاربرد آشکارساز است که به منظور کالیبره کردن آشکارسازهای نوترون در آزمایشگاه کالیبراسیون میدان نوترون پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، برای طراحی و ساخت یک مخروط سایه بهینه، ضریب تضعیف دز معادل نوترون به ازای ضخامت‌های مختلف آهن و پلی‌اتیلن در میدان چشمه $^{241}Am-Be$ ، با استفاده از کد MCNP حساب شده است؛ سپس با توجه به نتایج محاسبه، برای دستیابی به ضریب تضعیف مورد نیاز، ضخامت بهینه مخروط ۵۰ سانتی‌متر (شامل ۲۰ سانتی‌متر آهن و ۳۰ سانتی‌متر پلی‌اتیلن) تعیین شده است. در این حالت ضریب تضعیف نرخ دز معادل نوترون در میدان نوترونی چشمه $^{241}Am-Be$ با حضور مخروط سایه، برابر 0.00035 است که با استفاده از این مخروط سهم نوترون‌های پراکنده شده در پاسخ آشکارساز، بر اساس نتایج اندازه‌گیری و محاسبه با خطایی کمتر از 0.5% درصد در آزمایشگاه موردنظر قابل اندازه‌گیری است.

واژه‌های کلیدی: مخروط سایه، بهینه‌سازی، چشمه نوترون Am/Be کالیبراسیون، روش مونت کارلو، ضریب تضعیف، پراکنندگی

Optimization of Shadow Cone Length and Mass for Determining the Amount of Scattered Radiation Dose in the Calibration Laboratory of Am/Be Neutron Source

G. Raisali^{*1,2}, S. Hamidi³, E. Hallajfard³, A. Shahvar¹, N. Hajiloo¹

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

2- Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 11365-3486, Tehran - Iran

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

Abstract: The shadow cone technique is one of the methods which is used for determining the contribution of scattered particles on the response of neutron detectors. This technique is used for neutron field calibration in Agriculture, Medicine and Industry Research School (AMIRS). In this investigation, we have designed and constructed an optimized shadow cone. According to the calculated neutron dose equivalent attenuation factors, a cone with 20 cm of iron and 30 cm of polyethylene has been found as optimum. For this cone, the neutron dose equivalent attenuation factor for $^{241}Am/Be$ neutron source, is 0.00035 for which the contribution of scattered neutrons in AMIRS neutron calibration laboratory according to the calculation and measurement results, can be evaluated with less than 0.5% of error.

Keywords: Shadow Cone, Optimization, Am/Be Neutron Source, Calibration, Monte Carlo Method, Attenuation Factor, Scattering

*email: graisali@aeoi.org.ir

۱- مقدمه

کالیبره کردن مناسب دزیمترهای نوترون نیازمند این است که پاسخ دستگاه کالیبره شونده با توجه به اثر نوترون‌های پراکنده شده تصحیح شود [۱ تا ۴]. منشاء پراکندگی نوترون‌ها ممکن است تجهیزات اتاق کالیبراسیون، هوای اتاق، سقف، کف و دیوارهای اتاق باشد، که پراکندگی از دیوارها، کف و سقف اتاق دارای اهمیت بیشتری است [۵].

روشهای متعددی برای بررسی تصحیح‌های پراکندگی لازم برای کالیبره کردن دزیمترهای نوترونی وجود دارد که از لحاظ نحوه عملکرد در دو گروه دسته‌بندی می‌شوند [۶، ۷ و ۸]:

در گروه اول، اندازه‌گیری پاسخ دستگاه به تمام نوترون‌ها (نوترون‌های چشمه و نوترون‌های پراکنده) انجام می‌شود، سپس ترکیبی از محاسبات کمکی برای تعیین میزان نوترون‌های پراکنده صورت می‌گیرد.

گروه دوم از اندازه‌گیری مستقیم پاسخ دستگاه به نوترون‌های پراکنده، سپس کم کردن آن از پاسخ کل دستگاه کالیبره شونده جهت کالیبراسیون دزیمترها و شمارنده‌های نوترونی استفاده می‌کند، که اندازه‌گیری سهم نوترون‌های پراکنده با استفاده از یک مخروط سایه^(۱) صورت می‌گیرد [۹].

آشکارساز می‌رسند، کم کرد. این روش دارای مزیتی است که امکان اندازه‌گیری دقیق پرتوهای پراکنده را فراهم می‌سازد و اغلب به همراه شمارنده‌های طولیل^(۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اخیراً نشان داده شده است که این روش در آشکارسازهای کروی و استوانه‌ای هم کاربرد دارد [۶].

در انتخاب مواد به کار رفته در ساخت مخروط سایه، باید برای کند کردن نوترون‌ها و در نهایت جذب آنها، از موادی با عدد جرمی پائین، از جمله ترکیبات هیدروژن‌دار مانند آب، پارافین، پلی‌اتیلن و... استفاده شود. اما چون سطح مقطع پراکندگی و جذب نوترون‌ها در عناصر سبک، با افزایش انرژی نوترون کاهش می‌یابد، باید ابتدا انرژی این نوترون‌ها کاسته شود، سپس توسط مواد سبک، کند و جذب شوند. به همین جهت معمولاً مخروط را از دو جنس می‌سازند. قسمت جلویی مخروط که رو به چشمه است از مواد سنگین که دارای سطح مقطع پراکندگی ناکشسان بالایی می‌باشند (مانند آهن) و قسمت انتهایی مخروط برای کند کردن و جذب نوترون‌های عبوری از قسمت اول، از عناصر سبک (مانند پلی‌اتیلن) ساخته می‌شود [۱۳].

۳- روش محاسبات

در کاربرد روش مخروط سایه برای تعیین سهم نوترون‌های پراکنده شده در پاسخ دستگاه کالیبره شونده، اندازه‌گیری‌ها در دو مرحله: یکبار بدون حضور مخروط سایه و بار دیگر با حضور آن، صورت می‌گیرد. بنابراین هدف از بهینه‌سازی مخروط سایه دست یافتن به ضریب تضعیف مناسبی برای نوترون‌های مستقیم، به منظور تعیین دقیق‌تر میزان پراکندگی آنها می‌باشد.

برای بدست آوردن مشخصات مخروط سایه بهینه، پس از تعیین هندسه آن، نرخ دز معادل نوترون، به ازای ضخامت‌های متفاوت دو جنس آهن و پلی‌اتیلن، به وسیله کد MCNP-4C [۱۴] حساب شده است. استفاده از کد MCNP به منظور شبیه‌سازی تراز پرتوهای نوترون و پاسخ دزیمترها، در پژوهشهای متعددی مدنظر قرار گرفته است [۸، ۱۵ و ۱۶].

نظر به اینکه در آزمایشگاه کالیبراسیون پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی از میدان نوترون چشمه ²⁴¹Am-Be استفاده می‌شود، محاسبات در میدان چشمه نقطه‌ای

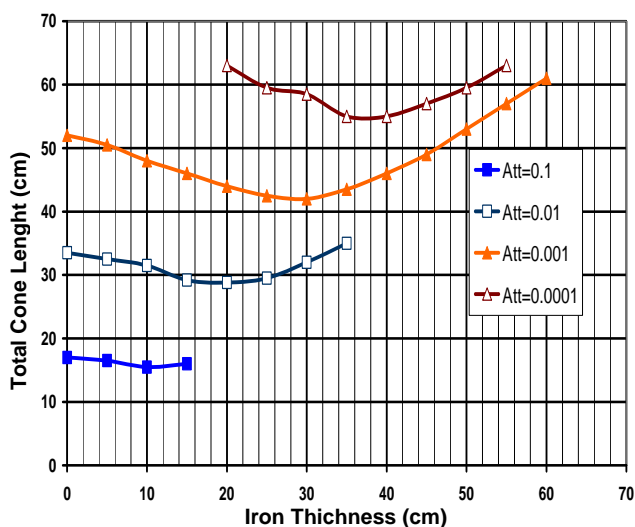
۲- روش مخروط سایه

در این روش، تعیین سهم نوترون‌های پراکنده به سوی آشکارساز، به وسیله دیوارها و هوای درون اتاق، به صورت تجربی و آزمایشگاهی، با استفاده از طراحی یک مخروط سایه برای جلوگیری از ورود نوترون‌های چشمه به آشکارساز، صورت می‌گیرد. بنابراین مخروط سایه حفاظی برای جلوگیری از نوترون‌های مستقیم وارد شونده به آشکارساز است [۱۰، ۱۱ و ۱۲].

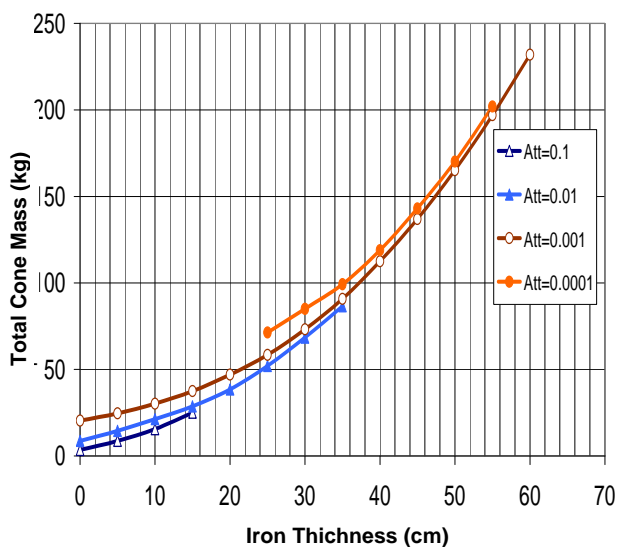
در این روش با قرار دادن یک مخروط سایه بین آشکارساز و چشمه، آشکارساز تنها نوترون‌های حاصل از پراکندگی در هوا و دیوارهای اتاق و هر ساختار درون آن را می‌شمارد، که قرائت آشکارساز در این وضعیت نشاندهنده پاسخ آن به نوترون‌های روی آور به سوی آشکارساز است. این پاسخ آشکارساز را می‌توان از پاسخ آن در حالت عدم حضور مخروط به منظور بدست آوردن پاسخ ناشی از نوترون‌هایی که مستقیماً از چشمه به



در شکل ۲، نمودار جرم کل مخروط برحسب ضخامت آهن بکار رفته در آن به ازای ضریب تضعیف‌های مختلف برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ رسم شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که استفاده از ضخامت کمتر آهن در ساخت مخروط، متناظر با جرم کمتر مخروط سایه است. به عنوان مثال چنانچه در ساخت مخروطی با ضریب تضعیف $0/0001$ به جای استفاده از آهن به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر از ضخامت ۲۰ سانتی‌متر استفاده شود جرم مخروط تقریباً به نصف کاهش می‌یابد.



شکل ۱- نمودار طول کل مخروط برحسب ضخامت آهن برای ضریب تضعیف‌های مختلف در حضور چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.



شکل ۲- نمودار جرم کل مخروط برحسب ضخامت آهن مورد استفاده در مخروط برای ضریب تضعیف‌های مختلف در حضور چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

همسانگرد و بیناب انرژی نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$ بدین طریق انجام گرفت که ابتدا نرخ دُز معادل نوترون بدون حضور مخروط (D_0) با استفاده از تالی F_4 و وارد کردن ضرایب تبدیل شار به نرخ دُز معادل نوترون [۱۷ و ۱۸] درون کره‌ای به شعاع $12/5$ سانتی‌متر به عنوان آشکارساز و در فاصله 150 سانتی‌متری چشمه انجام شد. سپس به منظور تعیین نرخ دُز معادل نوترون‌های عبوری از مخروط در حالت‌های طولی مختلف آن، محاسباتی با در نظر گرفتن برش‌هایی به ضخامت 5 سانتی‌متر به شکل مخروط ناقص از دو جنس آهن و پلی‌اتیلن با ضخامت‌های طولی متفاوت بین چشمه و آشکارساز صورت گرفت.

اگر نرخ دُز معادل نوترون در غیاب مخروط، D_0 و در حالت حضور آن بین چشمه و آشکارساز، D باشد، ضریب تضعیف مخروط که کمیتی بدون بُعد است به صورت D/D_0 تعریف می‌شود. بنابراین پس از محاسبه نرخ دُز نوترون برای حالت‌های مختلف مخروط سایه و تقسیم آن بر D_0 می‌توان ضریب تضعیف را بدست آورد.

۴- نتایج محاسبات

بر اساس نتایج بدست آمده از محاسبات انجام شده با کد MCNP برای ضخامت‌های مختلف پلی‌اتیلن و آهن، نمودار تغییرات طول کل مخروط برحسب ضخامت‌های مختلف آهن به ازای ضریب تضعیف‌های مختلف، در شکل ۱ رسم شده است. بطوری که در این شکل مشاهده می‌شود برای ضریب تضعیف $0/1$ با تغییر ضخامت آهن تغییر چندانی در طول کل مخروط بوجود نمی‌آید، به عنوان مثال، وقتی ضخامت آهن 15 سانتی‌متر باشد طول کل مخروط نسبت به حالتی که مخروط تنها از پلی‌اتیلن ساخته شود تغییر قابل توجهی نمی‌کند. بنابراین به منظور داشتن جرم کمتر، بهتر است که تنها از پلی‌اتیلن استفاده شود. در حالتی که ضریب تضعیف $0/0001$ باشد، کمترین طول مخروط مربوط به حالتی است که در ساخت آن از 35 سانتی‌متر آهن استفاده شود، در این صورت طول مخروط 55 سانتی‌متر خواهد بود. کمینه کردن طول مخروط از این جهت دارای اهمیت است که هر چه مقدار آن به ازای یک ضریب تضعیف مشخص کمتر باشد، می‌توان آشکارساز را به چشمه نزدیک‌تر کرد و از شدت بیشتر تابش نوترون‌ها برای تسریع در پرتودهی و همچنین خطای آماری کوچکتر بهره برد.

۵- نتایج اندازه‌گیری

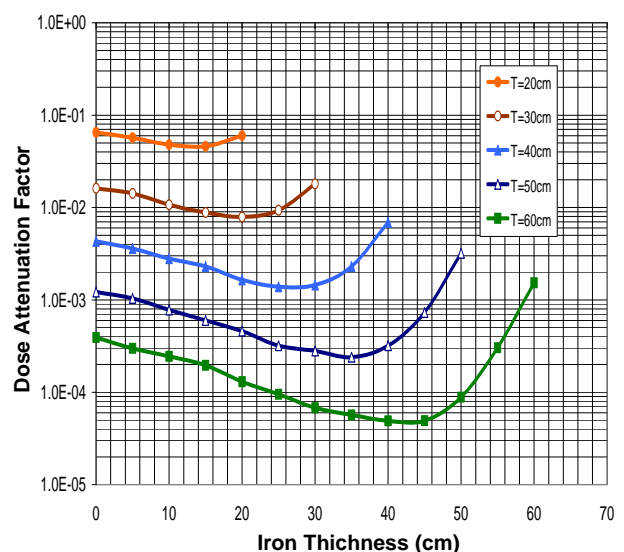
به منظور اندازه‌گیری میزان نوترون‌های پراکنده در آزمایشگاه کالیبراسیون میدان نوترون پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی در فواصل مختلف از چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ ، در حضور مخروط سایه، از آشکارساز نوترون مدل LB6411 ساخت شرکت Berthold [۱۹] استفاده شد. تصویری از آشکارساز به همراه مخروط سایه ساخته شده و سایر تجهیزات اندازه‌گیری در شکل ۴ نشان داده شده است. به عنوان مثال بر اساس طیف بدست آمده از محاسبات MCNP، نرخ دز در فاصله یک متری از چشمه، در غیاب مخروط سایه $141 \mu\text{Sv/h}$ و در حضور مخروط سایه $21 \mu\text{Sv/h}$ محاسبه شده است. مقادیر نظیر اندازه‌گیری شده به وسیله آشکارساز LB6411 برابر ۱۲۳ و ۱۶ میکرو سیورت در ساعت بدست آمده که در توافق نسبتاً خوبی با نتایج محاسبات می‌باشند [۲۰]. در مورد منابع خطای محاسبات می‌توان خطای ناشی از ساده‌سازی‌های انجام شده در هندسه مسأله، مقادیر سطح مقطع‌های اندرکنش‌ها در کد محاسباتی و خطای تصادفی محاسبات مونت کارلو (حدود ۵٪) را ذکر کرد. خطای ذاتی دستگاه دزیمتر LB6411 «حدود ۱۰٪»، وابستگی پاسخ دزیمتر به انرژی و جهت تابش نوترون‌های مستقیم و پراکنده نیز از دیگر منابع خطا در اندازه‌گیری‌های انجام شده‌اند.

در شکل ۳ نمودار ضریب تضعیف مخروط برحسب ضخامت آهن مورد استفاده در مخروط به ازای طول‌های مختلف مخروط رسم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود، چنانچه مخروطی به طول ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شود اختلاف ضریب تضعیف برای حالت‌های مختلف آن از لحاظ ضخامت‌های آهن و پلی‌اتیلن بیش از دو برابر نمی‌شود ولی برای طول‌های بیشتر، این اختلاف افزایش می‌یابد؛ به عنوان مثال در صورتیکه طول مخروط ۶۰ سانتی‌متر باشد، تغییر در ضریب تضعیف به ازای ضخامت‌های مختلف آهن و پلی‌اتیلن به بیش از ۱۰ برابر می‌رسد. بنابراین هر چه طول مخروط بیشتر شود بهینه‌سازی بیشتر اهمیت می‌یابد.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود، چنانچه مخروطی به طول کل ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود، ضریب تضعیف نوترون‌های مستقیم بین $0/0002$ تا $0/0003$ است، بنابراین سهم نوترون‌های عبوری در مقایسه با نوترون‌های پراکنده شده قابل اغماض خواهد بود. در این شکل، بیشترین ضریب تضعیف مربوط به حالتی است که از ۳۵ سانتی‌متر آهن در مخروط استفاده شود، اما با توجه به اینکه ضخامت کمتر آهن متناظر با جرم کمتر مخروط است و با توجه به اینکه برخی ضخامت‌های کمتر آهن، از جمله ۲۰ سانتی‌متر، از لحاظ تضعیف پرتوها تفاوت چندانی با آهن به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر ندارند، بنابراین به جهت داشتن مخروطی با جرم کل کمتر، ضخامت ۲۰ سانتی‌متر آهن را انتخاب کرده‌ایم، در این صورت ضریب تضعیف مخروط برابر با $0/00035$ خواهد بود.



شکل ۴- تصویری از مخروط سایه طراحی و ساخته شده و پیکربندی مورد استفاده در اندازه‌گیری دز نوترون‌های پراکنده شده در آزمایشگاه کالیبراسیون نوترون پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی.



شکل ۳- نمودار ضریب تضعیف مخروط برحسب ضخامت آهن مورد استفاده در مخروط به ازای طول‌های مختلف مخروط.



۶- بحث و نتیجه‌گیری

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Shadow-Cone
- ۲- Long Counter

References:

1. N. Roberts, NPL. "Problems associated with the calibration of area survey meters and personal dosimeters," workshop on determination of neutron dose equivalent, NPL (2003).
2. Safety Report Series No. 16, "Calibration of radiation protection monitoring instruments," International Atomic Energy Agency, Vienna (2000).
3. D. Singh, E. Pksch, B. Burgkhardt, "Investigation of room scattered neutrons and their importance for the calibration of albedo Dosimeters," commission of the European communities, proceedings of the fifth symposium on neutron dosimetry radiation protection aspects, 17-21 September 1984, Munich/Neuherberg (1984).
4. A. Rimpler, "Calibration of neutron dosimeters in the presence of scattered neutrons," Report SAAS 348 (1987).
5. C.M. Eisenhauer, J.B. Hunt, R.B. Schwartz, "Calibration techniques for neutron personal dosimetry," Radiat. Prot. Dosimetry. Vol. 10, No. (1-4), 43-57 (1985).
6. H. Tagziria and D.J. Thomas, "Calibration and Monte Carlo modeling of neutron long counters," Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A. 452, 470-483, (2000).
7. H. Schuhmacher, S. Guldbakke, H. Klein, H. Strzelczyk, "Response of two bonner spheres for 2.5 and 14.7 MeV neutrons determined with two different methods," ISSN 0572-7170 ISBN 3-88314-786-9 (June 1988).
8. R. Bedogni, G. Gualdrini, F. Montventi, "Field parameters and dosimetric characteristics of a fast neutron calibration facility: experimental and Monte Carlo evaluations," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A-476, 381-385 (2002).

در این تحقیق مشخص شد که برای ضخامت‌های زیاد یا ضریب تضعیف‌های بالا، محاسبات بهینه‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، بطوریکه برای مخروطی از آهن خالص به ضخامت ۶۰ سانتی‌متر، ضریب تضعیف برابر $1/5 \times 10^{-3}$ و برای مخروطی از پلی‌اتیلین خالص با همان ضخامت، برابر 4×10^{-4} خواهد بود. این در حالی است که کمترین ضریب تضعیف مربوط به ۴۵ سانتی‌متر آهن و ۱۵ سانتی‌متر پلی‌اتیلین، برابر 5×10^{-5} می‌باشد که ۳۰ برابر کمتر از حالت آهن خالص و ۸ برابر کمتر از حالت «پلی‌اتیلین خالص» است. این نتایج، اهمیت بهینه‌سازی را به روشنی نشان می‌دهند.

در روش مخروط سایه با توجه به ضریب تضعیف مخروط، هنوز بخشی از پاسخ آشکارساز در حالت حضور مخروط سایه، مربوط به نوترون‌های عبوری از مخروط است. بنابراین هر چه تضعیف مخروط بیشتر باشد قرائت آشکارساز در حالت حضور مخروط سایه به میزان واقعی نوترون‌های پراکنده نزدیکتر خواهد بود. چنانچه ضریب تضعیف بین $0/001$ تا $0/0001$ در نظر گرفته شود، سهم نوترون‌های عبوری در مقایسه با سهم نوترون‌های پراکنده قابل اغماض بوده و کالیبره کردن با دقت مناسبی انجام خواهد شد. با توجه به شکل ۳ انتخاب مخروطی به طول کل ۵۰ سانتی‌متر، ضریب تضعیف مناسبی را برآورده می‌کند. پس از انتخاب طول کل مخروط برای تعیین ضخامت آهن مورد استفاده در ساخت مخروط با در نظر گرفتن شکل ۳ و با توجه به اینکه تغییرات ضریب تضعیف مخروط در حالتی که ضخامت آهن از ۲۰ سانتی‌متر تا ۳۵ سانتی‌متر تغییر کند، اندک است، برای کاستن جرم مخروط، از کمترین ضخامت آهن (یعنی ۲۰ سانتی‌متر) برای ساخت مخروط استفاده شد. در این صورت با استفاده از مخروط سایه ساخته شده، شامل ۲۰ سانتی‌متر آهن و ۳۰ سانتی‌متر پلی‌اتیلین، دز معادل نوترون نسبت به حالت عدم وجود مخروط $0/00035$ بار کوچکتر خواهد بود. با توجه به ضریب تضعیف بدست آمده و مقادیر حساب شده یا اندازه‌گیری شده در مورد سهم نوترون‌های مستقیم و پراکنده، می‌توان با کاربرد این مخروط میزان دز ناشی از نوترون‌های پراکنده را با خطائی کمتر از ۰/۵ درصد تعیین کرد.

9. J.B. Hunt, "The calibration of neutron sensitive spherical devices," *Radiat. Prot. Dosimetry* 8, 239-251 (1984).
10. International standard, "Procedures for calibration and determining the response of neutron-measuring devices used for radiation protection purposes," ISO 10647, 1st edition (1996).
11. M.T. Cruz and L. Fratin, "Establishment of a procedure for calibrating neutron monitors at the physics institute of the university of Sao Paulo, Brazil," *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 44, No. 1/4, 143-146 (1992).
12. J.B. Hunt, "The calibration and use of long counters for the accurate measurement of neutron flux density,".
13. ک. کشتکار، اساتید راهنما: غ. رئیس‌علی، م. شمسایی، "تدوین نرم‌افزار بهینه‌سازی حفاظ اصلی رآکتورهای هسته‌ای با استفاده از روش غیرخطی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۷۹).
14. 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).
15. J. Saegusa, M. Yoshizawa, Y. Tanimura, M. Yoshida, T. Tamano, H. Nakaoka, "Evaluation of energy responses for neutron dose-equivalent meters made in Japan," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A-516, 193-202 (2004).
16. غ. رئیس‌علی، ن. حاجیلو، س. حمیدی، غ. اصلانی، "هماندسازی جویبارش نوترون‌ها در راهرو حفاظ اتاق هدف تالیوم Cyclone 30 با استفاده از کد کامپیوتری MCNP"، *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، سازمان انرژی اتمی ایران، شماره ۳۲، (۱۳۸۳).
17. International Organization for Standardization, "International standard, neutron reference radiations for calibrating neutron measurement devices used for radiation protection purposes," ISO 8529, 1st edition (1998).
18. Supplement to technical reports series No. 318, "Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes," International Atomic Energy Agency, Vienna, (2001).
19. EG & G. Berthold. "Operating manual neutron probe LB 6411," Id. No. 1-20188- 82042 BA2 Rev. No. 01 (1996).
20. ا. حلاج‌فرد، اساتید راهنما: غ. رئیس‌علی، س. حمیدی، "اندازه‌گیری و هماندسازی میدان نوترون و گامای چشمه ~~Al²⁷Be~~ با کد MCNP کالیبراسیون دزیمترهای نوترونی با روش مخروط سایه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، (خرداد ۱۳۸۴).