

تصحیح رفتار قانون عکس مجذور فاصله برای چشمه و آشکارساز حجمی در فضای پرتو دهی

عقیل محمدی*

دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، کدپستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

پست الکترونیکی: ag.mohammadi@aut.ac.ir

چکیده

قانون عکس مجذور فاصله جهت محاسبه شار پرتوها در فواصل مختلف از چشمه پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. این قانون برای چشمه و آشکارساز نقطه‌ای در خلاء کاربرد دارد. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی رفتار نقطه‌ای چشمه پرتو و آشکارساز غیر نقطه‌ای از طریق حذف نوترون‌های پراکنده جهت تصحیحات لازم در قانون عکس مجذور فاصله است. این کار با استفاده از چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ با اکتیویته 20 Ci ، شمارنده طویل و مخروط سایه انجام گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که توان فاصله در قانون عکس مجذور فاصله به جای عدد ۲ برابر با $1/907 \pm 0/010$ محاسبه شده است. هم‌چنین اکتیویته چشمه نوترون با شرایط بدست آمده برابر با $(17/95 \pm 0/96)\text{ Ci}$ محاسبه شده که با مقدار اسمی آن در هنگام اندازه‌گیری حدود $5/82\%$ اختلاف دارد.

کلیدواژگان: قانون عکس مجذور فاصله، شار نوترون، شمارنده طویل، اکتیویته چشمه نوترون.

۱. مقدمه

یکی از ضرایب منحصربه‌فرد می‌باشد که ممکن است وابسته به نرخ دز، طیف انرژی نوترون یا زاویه ورودی به وسیله اندازه‌گیری مورد نظر باشد، اما نباید وابسته به روش به کارگیری شده برای درجه‌بندی باشد [۱]. با این وجود، اندازه‌گیری دقیق شار نوترونی تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله عملکرد ابزار سنجش پرتو نوترونی (عملکرد واحد‌های الکترونیک هسته‌ای به کارگیری شده و بازدهی آشکارساز)، نوترون‌های پراکنده شده شامل پراکندگی از کف، دیوارهای اطراف، سقف و ابزارها و موانع ثابت موجود در فضای پرتو دهی می‌باشد. با فرض عملکرد صحیح ابزار سنجش

به منظور تعیین پاسخ ابزارهای سنجش پرتو نوترونی و در نهایت سنج‌بندی آن‌ها نیاز به اندازه‌گیری دقیق و صحیح شار نوترونی حاصل از چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترونی یا مولدهای نوترونی نظیر شتاب‌دهنده‌ها و راکتورهای هسته‌ای می‌باشد. هم‌چنین، صدور شناسنامه پرتوی یک چشمه نوترونی ساخته شده یا تعیین شار نوترون تولیدی از مولدهای نوترونی به منظور برآورد زمان پرتو دهی در کانال‌های مختلف یک راکتور یا شتاب‌دهنده، نیاز به اندازه‌گیری دقیق شار نوترونی در فاصله‌های مختلف دارد. علاوه بر این، بر اساس استانداردهای موجود، تعیین ضریب سنج‌بندی ابزار اندازه‌گیری نوترون،

چشمه نوترون و شمارنده نسبت به ابعاد فضای پرتو دهی و این که، کمترین فاصله شمارنده تا چشمه باید دو برابر طول مخروط سایه باشد، است [۸ و ۹]. هدف از این پژوهش، بهبود یا تصحیح قانون عکس مجذور فاصله در اندازه گیری اکتیویته چشمه نوترونی با استفاده از روش مخروط سایه می باشد.

۲. مواد و روش ها

۱.۲. چشمه نوترون

چشمه نوترون مورد استفاده یک چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ با اکتیویته ^{20}Ci است که از عمر آن حدود ۳۰ سال گذشته است. چشمه نوترون استوانه ای شکل بوده و دارای قطر 40mm و طول 140mm است. متوسط انرژی نوترون $4/4\text{ MeV}$ [۷] و گسیل نوترون به ازای هر کوری برابر $2/7 \times 10^6\text{ n/s}$ [۱۰] و $2/9 \times 10^6$ [۱۱] گزارش شده است.

۲.۲. آشکارساز مورد استفاده

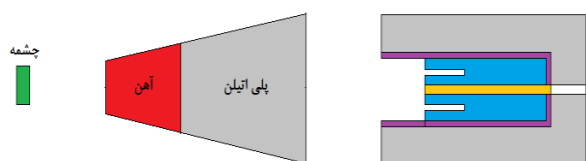
ابزار سنجش پرتوی نوترونی شمارنده طویل شامل یک شمارنده تناسبی BF_3 است که در دو لایه پلی اتیلنی به عنوان کندکننده های بیرونی و داخلی قرار گرفته و یک لایه جاذب نوترون های حرارتی از جنس B_2O_3 در بین آن ها قرار گرفته است (شکل ۱). اساس کار آن به این شکل است که نوترون های سریع حاصل از پراکندگی در محیط توسط کندکننده بیرونی حرارتی شده و توسط لایه جاذب نوترون های حرارتی جذب می گردد. در این صورت، نوترون های پراکنده شده در پاسخ آشکارساز کمترین اثر را دارد. علاوه بر آن، طول کندکننده بیرونی 7cm بیش تر از طول کندکننده داخلی است و این طول اضافه باعث می شود که شمارنده طویل به شکل یک شمارنده جهتی عمل نماید. پاسخ انرژی این شمارنده نیز در محدوده انرژی $0/10\text{MeV}-8\text{MeV}$ یکنواخت می باشد [۱۲].

پرتوی نوترونی، مهم ترین عامل نوترون های پراکنده شده است که امکان استفاده از چیدمان هندسه خوب به منظور دستیابی به باریکه موازی اصلی را دچار خدشه نموده و قانون عکس مجذور فاصله را دچار ابهام می نماید. در سنجش ابزاری سنجش پرتو نوترونی، علاوه بر دستیابی به پاسخ انرژی یکنواخت در یک محدوده مناسب و وسیع انرژی، نیاز به تعیین محدوده پاسخ دز نیز حائز اهمیت است. از طرفی نوترون های پراکنده به طور ذاتی همیشه در میدان های نوترونی وجود دارند و طیف انرژی آن ها نیز متفاوت از طیف انرژی نوترون های موجود در باریکه اصلی می باشد. از این رو، از ابزار سنجش پرتوی نوترونی شمارنده طویل [۲، ۳، ۴، ۵ و ۶] به دلیل پاسخ یکنواخت و جهتی این ابزار در محدوده وسیعی از انرژی و روش مخروط سایه برای حذف سهم نوترون های پراکنده شده از شار نوترونی اندازه گیری شده در میدان مرجع پرتو نوترونی استفاده می گردد [۷]. روش های مختلفی برای تخمین نوترون پراکنده از جمله روش نیمه تجربی، روش مخروط سایه و روش برازش چند جمله ای وجود دارد. در این صورت است که می توان در آزمایشگاه با استفاده از قانون عکس مجذور فاصله حتی با وجود پراکنده های مختلف نوترون، شار نوترون را در فواصل مختلف از چشمه نوترون با دقت خوبی اندازه گیری کرد [۱ و ۸]. شار نوترون در محل آشکارساز در میدان مرجع نوترون برای هر نقطه به صورت زیر است:

$$\Phi(E)_{\text{ref}} = \Phi(E)_{\text{direct}} + \Phi(E)_{\text{scatter}} \quad (1)$$

که در آن $\Phi(E)_{\text{ref}}$ شار کل نوترون در نقطه مرجع (محل آشکارساز)، $\Phi(E)_{\text{direct}}$ شار نوترون هایی که به طور مستقیم به آشکارساز می رسند و $\Phi(E)_{\text{scatter}}$ شار نوترون های پراکنده در محل آشکارساز می باشد [۹]. به منظور اندازه گیری شار نوترون های پراکنده در فضای پرتو دهی، از روش مخروط سایه استفاده می شود. به کارگیری روش مخروط سایه دارای شرایطی از جمله ابعاد بزرگ فضای پرتو دهی، ابعاد کوچک

مخصوص استقرار مخروط سایه و شمارنده طویل است. چیدمان آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. هر یک از سیستم‌های جابه‌جایی، دارای دقت ۱mm است. ارتفاع مرکز چشمه، مخروط سایه و شمارنده طویل از سطح زمین برابر ۱۷۵cm است. طول ریل مورد استفاده در حدود ۶۰۰cm است. کم‌ترین فاصله شمارنده طویل نسبت به چشمه نوترون برابر با ۱۵۰cm است. فضای پرتو دهی دارای ابعاد $20 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ است. فاصله چشمه نوترون تا دیواره‌های جانبی ۲۵۰cm و از دیواره پشتی حدود ۵۰۰cm است.



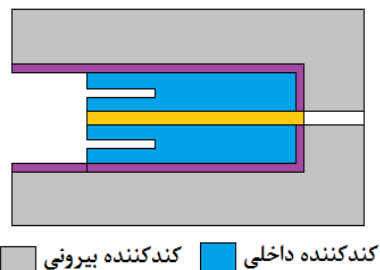
شکل (۳): چیدمان اندازه‌گیری شار نوترون (پراکنده) در فواصل مختلف از چشمه نوترون با استفاده از مخروط سایه و شمارنده طویل.

۵.۲. اندازه‌گیری شار خالص نوترون

بر اساس رابطه ۱، در هر نقطه از میدان به فاصله r از چشمه نوترون، ابتدا شار نوترونی بدون مخروط سایه اندازه‌گیری می‌شود تا شار کل نوترون $M_T(r)$ ، که مجموع شار نوترونی باریکه اصلی و پراکنده است، بدست آید (حالت اول). در ادامه، مخروط سایه بین چشمه و آشکارساز با همان شرایط قبل قرار داده می‌شود تا شار نوترونی پراکنده $M_S(r)$ ، بدست آید (حالت دوم). با کسر شار پراکنده $M_S(r)$ ، در حالت دوم از شار کل نوترون در حالت اول، شار خالص نوترون برای فواصل مختلف r از چشمه طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$[M_T(r) - M_S(r)] F_A(r) = a/r^b \quad (2)$$

که در آن $F_A(r)$ ضریب تضعیف هوا است که در این جا برابر با واحد در نظر گرفته شده است [۸]. از آن جا که، انتظار می‌رود تغییرات خالص شار نوترونی با افزایش فاصله به صورت عکس مجذور فاصله کاهش یابد، از این رو، با رسم تغییرات

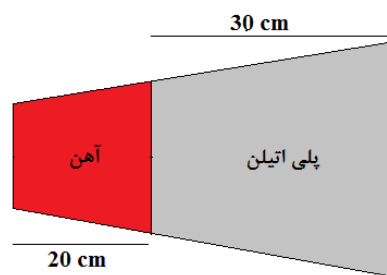


کندکننده داخلی
شمارنده BF3
جاذب نوترون حرارتی B203
کندکننده بیرونی

شکل (۱): اجزای اصلی شمارنده طویل.

۳.۲. مخروط سایه^۱

مخروط سایه مورد استفاده یک مخروط ناقص به طول ۵۰ سانتی‌متر است که طول ۲۰ سانتی‌متر (قسمت اول) آن از جنس آهن و ۳۰ سانتی‌متر (قسمت دوم) آن از جنس پلی‌اتیلن می‌باشد. مخروط سایه در شکل ۲ نشان داده شده است. قاعده کوچک آن که بخش اول مخروط است، روبروی چشمه نوترون قرار می‌گیرد و قاعده بزرگ آن روبروی شمارنده است. این مخروط به گونه‌ای طراحی و جانمایی شده است که در فاصله‌های مختلف، شمارنده طویل و چشمه نوترون در پوشش زاویه فضایی آن قرار دارد.



شکل (۲): اجزای اصلی مخروط سایه.

۴.۲. چیدمان اندازه‌گیری

این چیدمان شامل سیستم جابه‌جایی چشمه نوترون در راستای عمودی و سیستم جابه‌جایی شمارنده طویل و مخروط سایه در راستای افقی و ریل مورد نیاز جهت قرار گرفتن میزهای

^۱Shadow Cone

این اختلاف اکثرا به نوترون‌های پراکنده در محل شمارنده طویل مرتبط است.

با محاسبه اکتیویته چشمه نوترونی از طریق شار خالص نوترون در فواصل مختلف و مقادیر عددی محاسبه شده از تابع برازش شده می‌توان رفتار شمارنده طویل و چشمه نوترون را با رفتار چشمه و آشکارساز نقطه‌ای در خلاء مقایسه کرد. با مقایسه دو رابطه قانون عکس مجذور فاصله و تابع برازش شده در زیر:

$$\Phi(r)=S/4\pi r^2 \quad (4)$$

$$\Phi(r)=a/r^b \quad (5)$$

می‌توان گفت که $S=4\pi a$ ، که در آن S اکتیویته چشمه نوترون و r فاصله نسبی شمارنده طویل و چشمه نوترون است. در فرمول برازش شده به مقادیر شار خالص نوترون، مقدار عددی a برابر با $10^6 \times (6/598 \pm 0/354)$ بدست آمده است. هم‌چنین اختلاف نسبی دو کسر $1/r^2$ و $1/r^b$ برای تمام فواصل به طور متوسط برابر $1/51\%$ می‌باشد. به عبارتی با توجه به مقدار عددی بدست آمده در تابع برازش شده مقدار اکتیویته نوترونی حدود $1/51\%$ بیش‌تر از مقدار مورد انتظار محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به رابطه $S=4\pi a$ گسیل نوترونی چشمه در کل فضا برابر با $10^7 n/s \times (8/287 \pm 0/444)$ و معادل $1/64 \pm Ci$ (۳۰/۶۹) می‌باشد که با کاهش $1/51\%$ آن، مقدار گسیل نوترونی نهایی کل چشمه برابر $10^7 n/s \times (4/847 \pm 0/259)$ یا $1/96 \pm Ci$ (۱۷/۹۵) خواهد شد. از طرفی مقدار گسیل نوترون چشمه $^{241}Am-Be$ با شرایط ساخت استاندارد به ازای هر کوری برابر $10^7 n/s \times [10]$ است، که با این شرایط، چشمه نوترون با اکتیویته اسمی $20 Ci$ دارای گسیل کل نوترونی $5/4 \times 10^7 n/s$ در شروع ساخت می‌باشد. با توجه به گذشت ۳۰ سال از عمر چشمه فوق در هنگام اندازه‌گیری، گسیل نوترون چشمه در کل فضا برابر $5/146 \times 10^7 n/s$ محاسبه شده است که معادل $19/06 Ci$ است. بنابراین اختلاف نسبی اکتیویته محاسبه شده حاصل از اندازه‌گیری با شار خالص نوترون در فواصل

شار نوترون برحسب فاصله در یک نمودار، صحت این رفتار بررسی شده است. در کلیه اندازه‌گیری‌ها جهت تعیین شمارش نوترون، سطح زیر طیف انرژی شمارنده BF_3 لحاظ شده است. الکترونیک هسته‌ای مورد استفاده شامل پیش‌تقویت‌کننده مدل ۳۰۰۰، آمپلی فایر اسپکتروسکوپی مدل ۳۶۰۰، تحلیل‌گر چندکاناله مدل ۴۱۱۰ ساخت شرکت IAP^۱ جهت ثبت طیف انرژی شمارنده BF_3 می‌باشد. کلیه اندازه‌گیری‌ها در مدت زمان ۵۵۰s انجام شده است.

۳. بحث و نتایج

در شکل ۴ نتایج اندازه‌گیری نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که شار خالص نوترون با افزایش فاصله به صورت نمایی کاهش می‌یابد. از این رو، برای تعیین روند کاهش آن از رابطه زیر که شباهت زیادی با فرمول عکس مجذور فاصله دارد، استفاده گردیده است.

$$y=a/r^b \quad (3)$$

تابع برازش شده با داده‌های تجربی خالص بیان‌گر آن است که تغییرات شار خالص نوترونی به طور انتظاری به صورت مجذور عکس فاصله تغییر نمی‌کند، بلکه توان آن با مقدار انتظاری ۲ کمی تفاوت دارد. مقدار عددی (b) حاصل از این برازش برابر $1/907 \pm 0/010$ بوده و درصد اختلاف نسبی آن با مقدار انتظاری در حدود $4/65\%$ می‌باشد. این اختلاف به دلیل وجود هوا و حجمی از آن که در این فرآیند منجر به پراکندگی نوترون‌ها از درون باریکه اصلی به بیرون^۲ و از بیرون باریکه اصلی به داخل^۳ آن و نیز خودپراکندگی^۴ مخروط سایه مرتبط است. با برازش تابع شماره ۳ به شار کل نوترون‌ها، مقدار عددی (b) حاصل از برازش برابر با $1/423 \pm 0/011$ بدست آمده است که با مقدار انتظاری ۲ حدود $28/85\%$ اختلاف دارد که

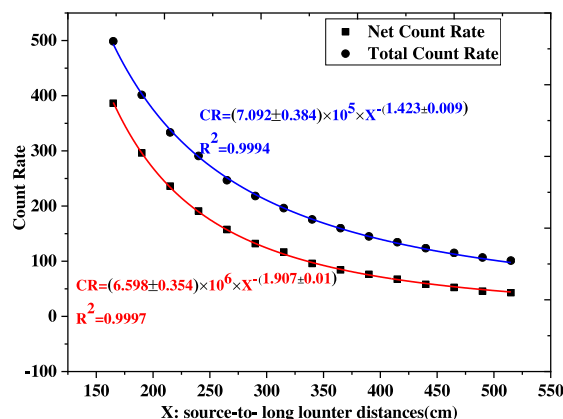
¹Institute of Applied Physics

²Out Scatter

³In Scatter

⁴Self Scattering

مختلف و اکتیویته اسمی هنگام اندازه گیری، حدود ۵/۸۲٪ است. اگر همین مراحل با مقدار عددی $1/423 \pm 0/011$ (با حضور نوترون های پراکنده) تکرار گردد، متوسط گسیل کل نوترون برای تمام فواصل برابر $10^9 \times (8/265 \pm 7/570)$ n/s خواهد شد که حدود ۱۰۰ برابر از مقدار بدست آمده با شار خالص نوترون بیش تر بوده و دارای عدم دقت ۹۱/۵۹٪ است. بنابراین هر چه مقدار عددی توان فاصله در فرمول برازش شده به عدد ۲ نزدیک تر باشد، رفتار شمارنده طویل و چشمه نوترون در آزمایشگاه به رفتار آشکارساز و چشمه نقطه ای در خلاء نزدیک تر بوده و محاسبه اکتیویته چشمه نوترون دقیق تر خواهد بود.



شکل (۴): رفتار نقطه ای چشمه نوترون و شمارنده طویل بدون حذف نوترون های پراکنده.

۴. نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده ابتدا، نشان داده شد که شار نوترون در فواصل مختلف از منبع آن با وجود پراکندگی نوترون در فضای پرتو دهی از قانون عکس مجذور فاصله

تبعیت نمی کند و در صورت به کارگیری این قانون محاسبه شار نوترون و دز ناشی از آن با مشکل مواجه خواهد شد. دوم این که، با توجه به روش های مختلف تخمین میزان پراکندگی نظیر روش نیمه تجربی، روش مخروط سایه و روش برازش چند جمله ای، مناسب ترین روش، استفاده از روش مخروط سایه جهت حذف نوترون های پراکنده در فضای پرتو دهی پیشنهاد می شود. در این صورت است که میدان پرتو نوترون با دقت خوبی درجه بندی شده و به عنوان میدان مرجع برای تعیین مشخصات ابزار سنجش نوترون مورد استفاده قرار گیرد. دستاورد سوم این که، استفاده از شمارنده طویل با پاسخ انرژی یکنواخت در محدوده $1\text{MeV} - 0/10\text{MeV}$ ، یکی از ویژگی های منحصر به فرد این پژوهش می باشد. زیرا که داشتن پاسخ انرژی یکنواخت، باعث شمارش اکثر نوترون های موجود در طیف انرژی ناشی از چشمه و نوترون های پراکنده با احتمال یکسان می شود. چهارم این که تصحیح انجام شده در قانون عکس مجذور فاصله، با ابزار و روش مناسب به کارگیری شده، باعث اندازه گیری اکتیویته چشمه نوترونی با دقت مناسبی شده است. به عبارتی از این به بعد می توان برای اندازه گیری اکتیویته چشمه های نوترونی موجود در کشور که مدت زیادی هم از عمر آن ها گذشته است، از این ابزار و روش پیشنهادی استفاده کرد. می توان با بهبود پاسخ انرژی شمارنده طویل در انرژی های بالاتر و استفاده از مخروط های سایه مختلف در یک محدوده فاصله معین و ثابت نگه داشتن شرایط محیطی شار نوترونی و نهایتاً اکتیویته منبع نوترونی را با دقت بهتری اندازه گیری کرد.

۵. مراجع

- [1] International Standard Organization ISO, Procedures for calibrating and determining the response of neutron-measuring devices used for radiation protection purposes, No. 10647(1996).
- [2] De Pangher, J., Nichols, A Precision Long Counter for Measuring Fast Neutron Flux Density, Rep. Batelle NWL-260; UC-37 (TID-4500), Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA (1966).
- [3] Z.M. Hua *et. al*, Experimental characterization of a long counter for neutron fluence Measurement, Radiation Measurements 119 (2018) 16 – 21
- [4] Guan-bo Wang, Da-zhi Qian, Jun-jie Li, Xin Yang, Run-dong Li, Bin Tang, Experimental and theoretical study of long counters on the departure of “point” assumption and scattering background influence, Radiation Measurements 82 (2015) 146-153
- [5] Q.Y. Hu *et. al*, An improved long counter for neutron fluence measurement with a flat response over a wide energy range from 1keV to 15MeV, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 768 (2014) 43–45
- [6] N.J. Roberts, D.J. Thomas, V. Lacoste, R. Böttger, S. Loe, Comparison of long counter measurements of monoenergetic and radionuclide source-based neutron fluence, Radiation Measurements 45 (2010) 1151-1153
- [7] International Standard ISO 8529-1, Reference Neutron Radiations-Part1:Characteristics and Methods of Production(2000).
- [8] British Standard ISO 8529-2, reference neutron radiations-Part2: Calibration fundamental of radiation protection device related to the basic quantities characterizing the radiation fields(2000).
- [9] IAEA, Calibration of radiation protection monitoring instruments, Safety Reports Series No.16(2000).
- [10] T. Kakavand, H. Ghafourian, M. Haji-Shafeieha, Designing an ²⁴¹Am-Be miniature neutron source, *Iran. J. Radiat. Res.*, 2007; 5(1): 41-44
- [11] Taner Uckan, José March-Leuba, Danny Powell, and James D. White, ²⁴¹Am-Be sealed neutron source assessment studies for the fissile mass flow monitoring, ORNL/TM-2003/184
- [12] A.mohammadi, *et. al*. New aspect determination of the photneutron contamination in 18MV medical linear acceleration. Radiation Measurements 95(2016) 55-61.