



تعیین پارامترهای فرمولاسیون کلی ضریب تصحیح هندسی آشکارسازهای غیر نقطه‌ای بوسیله محاسبات مونت کارلو

رحیم خباز

دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده

در طیف سنجی نوترون بوسیله سیستم‌های اندازه‌گیری غیر نقطه‌ای مانند کره‌های بانر، علاوه بر نوترونهای مستقیم، تعدادی از نوترونهایی که در راستای غیر مستقیم چشمه و شمارنده حرارتی هستند نیز به کره کندکننده برخورد کرده و پس از پراکندگی وارد شمارنده می‌شوند. این امر باعث غیر یکنواختی تابش به آشکارساز شده و یا به عبارتی در قانون عکس مجذوری فاصله اختلال ایجاد می‌شود؛ که جهت برطرف کردن آن ضریب تصحیح هندسی $F_1(l)$ را وارد می‌کنیم. در این پژوهش بوسیله شبیه‌سازی مونت کارلو ضریب تصحیح هندسی کره‌های پلی اتیلنی با قطرهای "۲"، "۳"، "۵"، "۸" و "۱۲" به همراه شمارنده 3He برای چشمه‌های نوترونی $^{241}Am-Be$ و ^{252}Cf محاسبه و سپس پارامترهای فرمولاسیون کلی اشاره شده برای این ضریب در استاندارد ISO-۱۵۲۹ تعیین شدند.

کلید واژه: ضریب تصحیح هندسی؛ چشمه نوترون؛ کره‌های بانر؛ محاسبات مونت کارلو

مقدمه

اگر یک آشکارساز نقطه‌ای با بازده ۱۰۰٪ در فاصله l از یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد نوترون با قدرت پرتودهی K قرار گرفته باشد، در این صورت بین شمارش آشکارساز، $C(l)$ ، و قدرت چشمه، K ، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$C(l) = \frac{K}{l^2} \quad (1)$$

که رابطه فوق همان قانون عکس مجذوری فاصله است. چنانچه آشکارساز از حالت نقطه‌ای خارج گردد و یا به عبارتی دارای ابعادی نسبتاً بزرگ باشد (نسبت به فاصله l)، در عمل دیگر رابطه (۱) صادق نمی‌باشد و می‌بایست اصلاحاتی را در آن داشته باشیم. و یا حتی ممکن است که چشمه ناهمسانگرد باشد و ...؛ بدین منظور ضرایبی را به عنوان ضرایب تصحیح وارد آن می‌کنیم:

$$C(l) = \frac{K}{l^2} F_1(l) F_2(l) F_3(l) \dots \quad (2)$$

در این رابطه $F_i(l)$ ها همان ضرایب تصحیح می‌باشند، که هر یک جهت تصحیح یک اختلال ایجاد شده در حالت ایده آل می‌باشد. ضریب تصحیح هندسی، $F_1(l)$ ، به دلیل بزرگ بودن آشکارساز، ضریب $F_2(l)$ به خاطر ناهمسانگردی چشمه نوترون و هستند. در اینجا تنها به شرح مختصری از ضریب تصحیح هندسی، $F_1(l)$ ، می‌پردازیم [۱].



به عنوان نمونه اگر جهت طیف سنجی نوترون از کره های بانر استفاده گردد، در این صورت با توجه به ابعاد کره تعدادی از نوترونهايي که در راستای مستقیم چشمه و آشکارساز حرارتی نیستند به کره کندکننده برخورد کرده و پس از پراکندگی وارد آشکارساز می شوند. این امر باعث غیر یکنواختی تابش به آشکارساز شده و یا به عبارتی در قانون عکس مجذوری فاصله اختلال ایجاد می شود و جهت برطرف کردن آن ضریب $F_1(l)$ را وارد می کنیم. یعنی $F_1(l)$ میزان نسبی نوترونهاي اضافی رسیده به آشکارساز را مشخص می کند. در ابتدا Axton از طریق محاسبات هندسی نشان داد که برای یک چشمه نقطه ای همسانگرد در مقابل آشکارساز کروی که در مرکز آن یک شمارنده حرارتی تعبیه شده است، پاسخ آشکارساز به صورت تقریبی با ضریب $(1 + \delta R^2/l^2)$ بیشتر از آن مقداری که از قانون عکس مجذوری انتظار می رود افزایش می یابد؛ که در این ضریب، R_D شعاع کره کندکننده اطراف آشکارساز حرارتی و l نیز فاصله چشمه نوترون تا مرکز کره است. ضریب δ نیز پارامتر تاثیر نام دارد [۲]. جمله R^2/l^2 مربوط به میزان نوترونهاي اضافی وارد شده به شمارنده حرارتی می باشد.

سپس Harrison نیز با استفاده از محاسبات مونت کارلو این مسئله را تایید کرد. ضریب هندسی فوق تنها مرتبه اول یک بسط بر حسب $(l/R_D)^2$ است؛ و مرتبه های بالاتر آن هنگامی که نسبت l/R_D به سمت یک میل می کند اهمیت بیشتری می یابد [۳]. توسط Hunt رابطه ای برای این ضریب به صورت زیر بیان شده است [۴]:

$$F_1(l) = 1 + \delta \left\{ \frac{l^2}{R_D^2} \left[1 - \left(1 - \frac{l^2}{R_D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - 1 \right\} \quad (3)$$

پارامتر δ در واقع به طور میانگین بیان کننده میزان تاثیر در تولید پاسخ در آشکارساز توسط یک نوترون می باشد [۵]. این پارامتر برای قطره های مختلف کره متفاوت خواهد بود به گونه ای که برای یک چشمه همسانگرد می تواند مقداری بین صفر تا یک داشته باشد.

رابطه (۳) فقط برای چشمه های نقطه ای و کوچک قابل قبول است؛ اما برای چشمه های نوترونی غیر نقطه ای مثل چشمه ^{252}Cf درون کندکننده D_2O مناسب نمی باشد؛ چرا که در آن ابعاد چشمه لحاظ نشده است. اولین بار توسط Kluge و همکارانش رابطه ای کلی برای ضریب تصحیح هندسی ارائه شد که قابل استفاده برای چشمه های نقطه ای و غیر نقطه ای بود [۶]:

$$F_1(l) = 1 + \frac{a_2}{(1+a_0 L)^2} \quad (4)$$

که L در آن به صورت زیر تعریف می شود:

$$L = \frac{(l-R_D-R_S)}{R_D} \quad (5)$$

که R_S شعاع چشمه نوترون، R_D شعاع آشکارساز و l فاصله مرکز چشمه تا مرکز آشکارساز می باشد. همانگونه که از روابط (۳) و (۴) مشاهده می گردد، با افزایش l ضریب تصحیح هندسی، $F_1(l)$ ، کاهش می یابد. در واقع این ضریب در تصحیح پاسخ سیستم برای فواصل کم از اهمیت بیشتری برخوردار است.



چنانچه چشمه نوترون نقطه ای باشد می توان با داشتن پارامترهای a_f و a_h و قراردادن $R_S = 0$ در رابطه فوق، ضریب تصحیح هندسی سیستم آشکارسازی را بدست آورد (برای این مورد $L = (l - R_D)/R_D$). پارامترهای a_f و a_h مستقل از فاصله چشمه تا آشکارساز و تا حدودی وابسته به طیف انرژی نوترونهای فرودی بر آشکارساز می باشند.

بر اساس استاندارد ISO-۸۵۲۹ اطلاعات کمی در مورد پارامترهای a_f و a_h موجود است، و هنوز برای بسیاری از طیف های نوترونی نقطه ای در معرض سیستم های اندازه گیری غیر نقطه ای این پارامترها تعیین نشده اند [۷]. هدف از این پژوهش تعیین پارامترهای a_f و a_h در رابطه (۴) برای برخی از چشمه های رادیوایزوتوپی نوترون با استفاده از محاسبات شبیه سازی مونت کارلو می باشد.

روش کار

بر اساس گزارش ICRP پاسخ ایده آل سیستم کره های بانر زمانی حاصل می شود که باریکه ای از پرتوهای نوترونی به صورت موازی به کره بتابد [۸]. ضریب تصحیح هندسی، $F_1(l)$ ، از تقسیم مقدار پاسخ آشکارساز در معرض پرتو واگرا به میزان پاسخ آشکارساز در مقابل پرتو موازی بدست می آید. تابش پرتوهای کاملاً موازی به آشکارساز به گستردگی سطح مقطع کره به صورت تجربی امکانپذیر نبوده و مشکلات تکنیکی مربوط به خود را دارد، مگر اینکه سیستم بطور تقریبی در معرض پرتو باریک موازی شده ای از نوترونها قرار گیرد. بنابراین امروزه با توسعه محاسبات شبیه سازی ترابرد نوترون و وجود سطح مقطع انواع واکنشهای نوترون با مواد می توان پاسخ هر سیستم اندازه گیری را تحت تابش پرتوهای موازی و یا واگرا تعیین نمود. یکی از کدهای شبیه سازی پرکاربرد و قابل اطمینان در این زمینه کد مونت کارلوی MCNP است [۹].

با شبیه سازی دقیق آشکارساز در معرض پرتوهای موازی ساطع شده از قرصی به شعاع خود آشکارساز، می توان پاسخ ایده آل آن را بدست آورد. همچنین با قراردادن چشمه نقطه ای پاسخ واقعی سیستم حاصل می گردد. که از تقسیم این دو پاسخ ضریب تصحیح هندسی، $F_1(l)$ ، بدست می آید. یک روش اولیه برای تعیین پارامترهای a_f و a_h این است که ابتدا ضریب تصحیح هندسی را در فواصل مختلف بدست آورد و سپس مقادیر بدست آمده را بر روی تابع رابطه (۴) برازش داد.

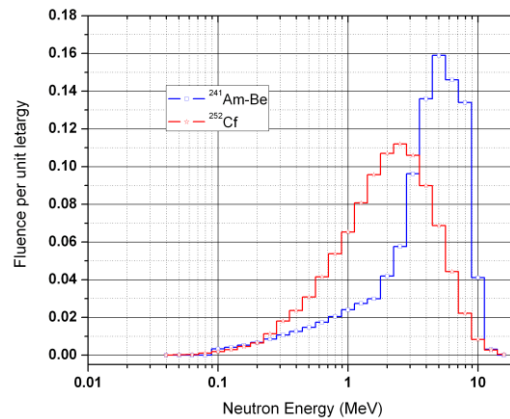
روشی دیگر آن است که چشمه نقطه ای را در فاصله $l = R_D$ قراردسیم (یعنی در تماس با سطح کره) و محاسبات ضریب هندسی را انجام دهیم. در این حالت $L = 0$ می باشد و ضریب تصحیح هندسی برای یک شعاع خاص تنها تابعی از a_f می باشد یعنی:

$$F_1(l) = 1 + a_f \quad (6)$$

پس از تعیین پارامتر a_f می توان با محاسبه ضریب تصحیح هندسی در فاصله ای دیگر، $l \neq R_D$ ، مقدار پارامتر a_h را بدست آورد.



در این پژوهش تعدادی از کره های بانر از جنس پلی اتیلن با قطرهای $2''$ ، $3''$ ، $5''$ ، $8''$ و $12''$ که در مرکز آنها یک شمارنده حرارتی ^3He کروی به قطر $3/2\text{ cm}$ (SP4-Type) تعبیه شده بود، تحت تابش دو چشمه رادیو-ایزوتوپی نوترون با طیف انرژی مختلف و انرژی میانگین متفاوت قرار داده شد. این چشمه های نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf بودند که انرژی میانگین آنها به ترتیب حدود $4/46\text{MeV}$ و $2/54\text{MeV}$ می باشد (شکل-۱) [۱۰].



شکل-۱ طیف های انرژی دو چشمه رادیوایزوتوپی نوترون [۱۰].

نتایج و بحث

در ابتدا با استفاده از محاسبات شبیه سازی توسط کد مونت کارلوی MCNP4C چشمه های نقطه ای $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf (با پرتوهای همسانگرد و واگرا) در تماس با سطح کره های پلی اتیلنی به قطرهای $2''$ ، $3''$ ، $5''$ ، $8''$ و $12''$ اینچی، مجهز به شمارنده حرارتی ^3He ، قرارداد شدند و پاسخ هریک از آنها محاسبه گردید. همچنین در شبیه سازی دیگری این سیستم آشکارسازی تحت تابش چشمه ای قرص مانند به قطر کره مربوطه و با پرتوهای موازی و دارای طیف انرژی چشمه های نوترونی ذکر شده قرار داده شد تا پاسخ این حالت نیز بدست آید. از تقسیم این دو پاسخ ضریب تصحیح هندسی برای هر مجموعه کره - چشمه بدست می آید. سپس با جایگذاری ضریب تصحیح بدست آمده در رابطه (۶)، پارامتر a_f محاسبه گردید. نتایج این محاسبات در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول-۱ پاسخ کره های بانر همراه با ^3He و ضریب تصحیح هندسی حاصل برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ در حالت

$$L=0$$

قطر کره (اینچ)	پاسخ پرتوهای واگرا (cm^2)	پاسخ پرتوهای موازی (cm^2)	$(F_1(L))_{Max}$	a_f
۲	$7,8873E-03$	$4,2574E-03$	۱,۸۵۲۶	۰,۸۵۲۶
۳	$1,7858E-01$	$1,0185E-01$	۱,۷۵۳۴	۰,۷۵۳۴



۵	$1,4330E+00$	$8,3687E-01$	۱,۷۱۲۳	۰,۷۱۲۳
۸	$2,9925E+00$	$1,8245E+00$	۱,۶۴۰۲	۰,۶۴۰۲
۱۲	$2,7132E+00$	$1,7492E+00$	۱,۵۵۱۱	۰,۵۵۱۱

جدول ۲- پاسخ کره های بانر همراه با ${}^3\text{He}$ و ضریب تصحیح هندسی حاصل برای چشمه ${}^{252}\text{Cf}$ در حالت $L=0$.

قطر کره (اینچ)	پاسخ پرتوهای واگرا (cm^2)	پاسخ پرتوهای موازی (cm^2)	$(F_1(L))_{Max}$	a_f
۲	$3,5048E-02$	$1,8750E-02$	۱,۸۶۹۲	۰,۸۶۹۲
۳	$5,4582E-01$	$3,0909E-01$	۱,۷۶۵۹	۰,۷۶۵۹
۵	$2,8040E+00$	$1,6127E+00$	۱,۷۳۸۷	۰,۷۳۸۷
۸	$3,6930E+00$	$2,2259E+00$	۱,۶۵۹۱	۰,۶۵۹۱
۱۲	$2,0118E+00$	$1,2992E+00$	۱,۵۴۸۵	۰,۵۴۸۵

با مقایسه نتایج جداول ۱ و ۲ مشاهده می گردد که پارامتر a_f تا حدود کمی به انرژی نوترون و همچنین نسبتاً به ابعاد سیستم اندازه گیری وابسته است.

در محاسباتی جداگانه چشمه های نوترونی فوق الذکر را به ترتیب در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتری از مرکز کره های ۲، ۳، ۵، ۸ و ۱۲ اینچی قرارداد و پاسخ آنها محاسبه گردید. از آنجایی که پارامترهای a_f و a_0 مستقل از فاصله، l هستند لذا در این شبیه سازی فواصل کوچک در نظر گرفته شدند تا خطای آماری محاسبات کاهش یابد. لذا با تقسیم این پاسخ ها به پاسخ پرتوهای موازی قبلی ضرایب تصحیح برای فواصل جدید بدست می آیند. که با داشتن مقدار پارامتر a_f و استفاده از روابط (۴) و (۵) مقدار پارامتر a_0 برای هر مجموعه کره- چشمه بدست آورده شد. نتایج این محاسبات در جداول ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳- پاسخ کره های بانر همراه با ${}^3\text{He}$ و ضریب تصحیح هندسی حاصل برای چشمه ${}^{241}\text{Am-Be}$ در حالت $L \neq 0$.

قطر کره (اینچ)	L	پاسخ پرتوهای واگرا (cm^2)	پاسخ پرتوهای موازی (cm^2)	$F_1(L)$	a_0
۲	۰,۹۶۹	$4,5324E-03$	$4,2574E-03$	۱,۰۶۴۶	۲,۷۱۷۲
۳	۰,۳۱۲	$1,1827E-01$	$1,0185E-01$	۱,۱۶۱۲	۳,۷۲۴۰
۵	۰,۵۷۵	$9,1266E-01$	$8,3687E-01$	۱,۰۹۰۶	۳,۱۳۷۳
۸	۰,۴۷۶	$1,9999E+00$	$1,8245E+00$	۱,۰۹۶۱	۳,۳۲۱۵
۱۲	۰,۳۱۲	$1,9531E+00$	$1,7492E+00$	۱,۱۱۶۶	۳,۷۶۲۹



جدول ۴- پاسخ کره های بانر همراه با ${}^3\text{He}$ و ضریب تصحیح هندسی حاصل برای چشمه ${}^{252}\text{Cf}$ در حالت $L \neq 0$.

قطر کره (اینچ)	L	پاسخ پرتوهای واگرا (cm^2)	پاسخ پرتوهای موازی (cm^2)	$F_1(l)$	a_0
۲	۰,۹۶۹	$1,9975E-02$	$1,8750E-02$	۱,۰۶۵۳	۲,۷۳۳۱
۳	۰,۳۱۲	$3,6006E-01$	$3,0909E-01$	۱,۱۶۴۹	۳,۷۰۲۴
۵	۰,۵۷۵	$1,7646E+00$	$1,6127E+00$	۱,۰۹۴۲	۳,۱۳۱۰
۸	۰,۴۷۶	$2,4494E+00$	$2,2259E+00$	۱,۱۰۰۴	۳,۲۸۱۹
۱۲	۰,۳۱۲	$1,4525E+00$	$1,2992E+00$	۱,۱۱۸۰	۳,۷۰۵۱

با توجه به نتایج جداول ۳ و ۴ ملاحظه می گردد که پارامتر a_0 نیز تا حدود کمی به انرژی نوترون و همچنین نسبتاً به ابعاد سیستم اندازه گیری وابسته است.

از آنجایی که پارامترهای a_2 و a_0 مستقل از فاصله l هستند، لذا با داشتن این مقادیر، و استفاده از روابط (۴) و (۵) می توان ضریب تصحیح هندسی سیستم کره های بانر را برای هر فاصله بین چشمه های نوترون ${}^{241}\text{Am}$ و Be و ${}^{252}\text{Cf}$ بدست آورد، و در کالیبراسیون سیستم استفاده نمود. همچنین این محاسبات قابل تعمیم برای چشمه های نوترونی دیگر با طیف هایی متفاوت می باشد.

مراجع

- [۱] Khabaz R., Miri, S. H., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* ۲۸۹, ۷۸۹-۷۹۴ (۲۰۱۱).
- [۲] Axton E. J., *J. Nucl. Ener.* ۲۶, ۵۸۱-۵۸۳ (۱۹۷۲).
- [۳] Harrison K. G., *Nucl. Instrum. Meth.* ۱۸۴, ۵۹۵-۵۹۷ (۱۹۸۱).
- [۴] Hunt J. B., *Radiat. Prot. Dosim.* ۸, ۲۳۹-۲۵۱ (۱۹۸۴).
- [۵] Khabaz R., Izadi R. N., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* DOI: 10.1007/s10967-012-2286-9 (۲۰۱۲).
- [۶] Kluge H., Weise K., Hunt J. B., *Radiat. Prot. Dosim.* ۲۳, ۲۳۳-۲۴۴ (۱۹۹۰).
- [۷] ISO ۸۵۲۹-۲ Reference neutron radiations-part ۲: *International Organization for Standardization*, Geneva (۲۰۰۰).
- [۸] ICRP Publication ۲۱, Pergamon Press, *Oxford* (۱۹۷۳).
- [۹] Briesmeister J. F., MCNP-a general Monte Carlo N-particle transport code, Version ۴C. Los Alamos National Laboratory Report **LA-۱۳۷۰۹-M**, Los Alamos (۲۰۰۰).
- [۱۰] Griffith R. V., Palfalvi J., Madhvanath U., *International Atomic Energy Agency*, Technical Report Series No. ۳۱۸ (۱۹۹۰).