

* روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی

مجید خوشنودی

امور حفاظت در برابر اشعه
سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

اندازه‌گیری تغییرات پاسخ یک آشکارساز کروی شکل نوترون تحت تابش یک چشمه آمرسیوم-برلیوم نسبت به تغییرات فاصله چشمه از آشکارساز در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. این تغییرات به شکل تابع و متغیر بوسیله پنج مدل ریاضی که منتج از یک مدل کلی است مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و ضریب مشخصه کالیبره کردن چشمه آشکارساز مورد نظر و نیز سایر ضرایب مربوط به سهم شرکت نوترونهای برگشتی از جدارهای اتاق اندازه‌گیری و هوای درون آن در پاسخ کلی دستگاه محاسبه گردیده است.

نظیر این تجربیات در آزمایشگاه دزیمتری PTB واقع در آلمان غربی انجام شده و نتایج آن با نتایج ارائه شده در این مقاله که در آزمایشگاه دزیمتری CRE واقع در ایتالیا حاصل گردیده، مقایسه شده است.

مقدمه

کالیبره نمودن آشکارسازهای دارای کندکننده که جهت استفاده در حفاظت در برابر اشعه ساخته میشوند، از طریق تابش آنها با یک چشمه نوترون با میزان پرتو دهی مشخص انجام میگیرد. سپس پاسخ دستگاه نسبت به نوترونها را میتوان با استفاده از شمارشهای بدست آمده از دستگاه و تعداد نوترونهای محاسبه شده در واحد سطح و در محل استقرار آشکارساز بدست آورد. چنانچه پاسخ بر حسب دز معادل مورد نظر باشد، باید شمارشهای بدست آمده را با استفاده از فاکتورهای مبدل ویژه تبدیل به دز معادل

نمود (۱)

معمولا "کارخانه سازنده آشکارسازهای نوترون برای کالیبره کردن این وسائل دستورالعملی بصورت یک جزوه ارائه میدهند که بر طبق آن تنها با استفاده از یک نقطه و بکاربردن یک چشمه نوترون و گاهی همراه با یک چشمه گاما، میتوان آشکارسازهای مورد نظر را کالیبره نمود. با وجود اینکه بنظر میرسد این روش برای اهداف عملی در حفاظت در برابر اشعه کافی باشد ولی دقیق نخواهد بود. اهداف کالیبره کردن دقیق وسائل حساس به پرتو نوترون ایجاب میکند که پاسخ آشکارساز نسبت به نوترونها

* قسمتی از این مقاله مشترکا با آقای مارکوفرتی (Marco Ferretti) ایتالیایی از ENEA، در سال ۱۹۸۵ در بیست و چهارمین کنگره ملی حفاظت در برابر اشعه ایتالیا در شهر تورینو ارائه گردیده است.

مجید خوشنودی . روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی .

تابش آشکار ساز است . با ملحوظ داشتن R_e در رابطه (۱) قانون عکس مجذور فاصله رعایت میگردد . از آنجائیکه مقادیر اندازه‌گیری و نشان داده شده در این مقاله تنها مربوط به آشکارسازهای کروی می‌باشد و در این آشکارسازها فرض بر این است که مراکز هندسی و موثر برهم منطبق‌اند ، پس میتوان نوشت :

$$R_e = R \quad \text{و} \quad D_o = D + R$$

با وجود این جائیکه محاسبه R_e مورد نظر است بین R و R_e وجه تمایز منظور گردیده است . $F_1(D)$ ضریبی است هندسی که با استفاده از آن میتوان مقدار انحراف از قانون عکس مجذور فاصله را که ناشی از حجم آشکارساز است محاسبه نمود (۳) :

$$F_1(D) = 1 + \delta \left\{ 2 \frac{D_o^2}{R^2} \left(1 - \left(1 - \frac{R^2}{D_o^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) - 1 \right\} \quad (2)$$

در این عبارت δ ضریب تاثیر پذیری نوترون نامیده میشود که در واقع مبین تاثیر نسبی نوترونیایی است که وارد حجم آشکارساز شده و در پاسخ آشکارساز اثر می‌گذارند . بنابر نظر اکستون (Axton) این ضریب احتمالا " تابعی از انرژی نوترونهای چشمه بوده و دارای مقداری بین صفر و یک می‌باشد . بر اساس نتیجه‌گیری‌های اکستون کمیت δ در میدانهای ایزوتراپی (Isotropic) برای کلیه آشکارسازهای کروی یکسان و برابر $\frac{1}{3}$ است (۴) . اندازه‌گیری‌های جدید که در آنها از چشمه‌های کوچک کالیفرنیوم استفاده شده است ، ثابت میکنند که معادله (۲) میتواند پاسخهای آشکارساز در فواصل خیلی دور و نزدیک را دقیقاً " به یکدیگر مربوط سازد (۲) . $F_2(D)$ عامل دیگری است که اثرات منابع پراکنده کننده نوترون را در پاسخهای آشکارساز تصحیح می‌نماید :

پراکنده شده (Scattered Neutrons) از جداره‌های اتاق اندازه‌گیری و هوای درون آن تصحیح گردد . در هر حال نتایج حاصل وقتی قابل اعتماد خواهند بود که با آنچه در یک آزمایشگاه دیگر بدست می‌آید قابل مقایسه باشند . تاکنون توسط پژوهشگران در آزمایشگاههای مختلف مدل‌های گوناگونی جهت استخراج ضرایبی که در کالیبره کردن آشکارسازهای نوترون شرکت دارند ، پیشنهاد شده است . قابلیت کاربرد این مدلها محدود بوده و این محدودیت اساساً " مربوط به برد فاصله چشمه از آشکارساز می‌باشد . لذا کاربرد این مدلها منجر به نتایج غیریکسان میشود . آنچه در این مقاله نشان داده میشود ، مراحل یک روش عمومی (۲) کالیبره کردن دستگاههای حساس به نوترون است که میتواند تمام مدل‌های بکارگرفته شده را یکسان جلوه دهد . تنها محدودیتی که در این روش است در نوع آشکار ساز و کندکننده آنست که باید هر دو کروی باشند . در این حالت نتایج میتواند در محیطهای دیگر قابل تجدید باشد .

بررسیهای نظری

اصولاً " در فضای خلاء و خالی از هرگونه بازتاب‌کننده ، برای یک آشکارساز و یک چشمه نقطه‌ای حاصلضرب مجذور فاصله و میزان شمارش مقداری است ثابت . ولی در شرایط واقعی بوجود آوردن آشکارساز و چشمه نقطه‌ای از نظر فیزیکی عملی نیست ، لذا قانون عکس مجذور فاصله طبق رابطه زیر تصحیح میگردد :

$$C(D) = \frac{F_1(D)F_2(D)K}{(D+R_e)^2} \quad (1)$$

در این رابطه $C(D)$ میزان شمارش کلی (شامل نوترونهای پراکنده شده) ، D فاصله مرکز هندسی چشمه و محل تقاطع خط‌المرکزین با سطح در معرض

$$\frac{R_r}{R_0} = \alpha g \frac{\sigma_r}{\sigma_0} (r/r_c)^2 \quad (5)$$

در این معادله :
 R_0 و R_r به ترتیب پاسخ‌های آشکارساز برای نوترونهای بازتاب شده از اتاق و "مستقیم از چشمه" α ضریب آلبدوی (Albedo) سطح بازتاب کننده، g فاکتور تصحیح‌کننده پاسخ زاویه‌ای آشکارساز، σ_0 و σ_r به ترتیب پاسخ‌های آشکارساز برای نوترونهای چشمه و بازتاب شده از جدارهای اتاق است که در میانگین انرژی طیفی مربوط به خود هستند و سرانجام r که فاصله مرکز بین چشمه و آشکارساز می‌باشد. معادله (۵) در مورد اتاقهای غیرکروی نیز قابل استفاده است، مشروط بر اینکه r_c شعاع سطح کروی معادل باشد. در معادله (۱)، K مشخصه ثابت چشمه آشکارساز نامیده میشود. این ضریب تابعی از چند عامل است و معادله زیر آنها را به یکدیگر مربوط می‌سازد.

$$K = \frac{Q F(\theta = 90^\circ) \varepsilon}{4\pi} \quad (6)$$

Q قدرت چشمه نوترون و $F(\theta)$ ضریب تصحیح‌کننده انحراف نشر چشمه از یک چشمه ایزوتروپیک معادل است. مقدار متوسط $F(\theta)$ را میتوان از راه اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

$$F(\theta) = \frac{2 c(\theta)}{\int \pi c(\theta) \sin \theta d\theta}$$

در این عبارت $c(\theta)$ میزان شمارش در زاویه θ که آن زاویه بین محور چشمه و شعاع و اصل مرکز چشمه و نقطه مورد اندازه‌گیری است. بعلاوه استوانه‌ای شکل بودن چشمه‌های نوترون و استفاده از نشر آنها در امتداد شعاع استوانه، لازم است که ضریب F در $(\frac{\pi}{2})$ در نظر گرفته شود.

$$F_2(D) = 1 + AD_0 + SD_0^2 \quad (3)$$

در این رابطه AD_0 مولفه نسبی نوترونهای پراکنده شده از هوای اتاق اندازه‌گیری است. این مولفه شامل دوجزء است که یک قسمت (ND_0) نشان‌دهنده نوترونهای حذف شده از مسیر حرکت مستقیم به سمت آشکارساز و دیگری (LD_0) شامل نوترونهای پراکنده شده از ملکولهای هوا به روی آشکارساز است. پس :

$$F_2(D) = 1 + (L-N)D_0 + SD_0^2 \quad (4)$$

در اینجا N ، ضریب کاهش خطی برای میانگین انرژی طیف چشمه در محیط واسط (هوا) است. مقدار این ضریب در شرایط فیزیکی اندازه‌گیری‌های ما یعنی دمای $19^\circ C$ ، فشار 10^5 پاسکال و رطوبت نسبی 50% ، $0.0089 m^{-1}$ بدست آمد. محاسباتی که اخیراً با استفاده از روش مونت کارلو انجام گرفته است نشان میدهد که $L \approx 2N$ است، در نتیجه مقدار AD_0 همواره مثبت بوده و با افزایش D یک افزایش نسبی در پاسخ بوجود می‌آید. مبنای این محاسبات با توجه به این حقیقت است که انرژی طیف نوترونهای پراکنده شونده بر اثر برخورد گوی‌وار نوترونها با اتمهای اکسیژن و نیتروژن به انرژی‌های پائین طیف چشمه متعادل میگردد. در این حالت تاثیر این نوترونها با استفاده از انتگرال بر حسب عناصر انرژی و پاسخ زاویه‌ای آشکارساز قابل محاسبه می‌باشد. SD_0^2 پاسخ نسبی آشکارساز برای نوترونهای پراکنده شده از دیوارها، سقف و کف اتاق اندازه‌گیری است. بر اساس فرضیه‌های موجود (۷-۵) در حوالی مرکز یک اتاق اندازه‌گیری کروی شکل به شعاع r_c این نسبت برابر است با :

مجید خوشنودی . روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی

ε، ضریب دیگری است موسوم به حساسیت آشکار - ساز که خود بستگی به انرژی طیف چشمه و نوع آشکارساز مورد کاربرد دارد.

مدلهای کالیبره کردن آشکارسازهای

کروی شکل دارای کندکننده

الف - روش سایه مخروط (Shadow-Cone Technique) اساس بهره‌گیری از این روش در کاربرد مخروطهای ناقصی استوار است که بوسیله آنها میتوان در مقابل تابش مستقیم به روی آشکارساز سایه افکند (۸ و ۹) . در عوض ، مولفه پراکندگی نوترونها از محیط را بطور مستقیم اندازه‌گیری نمود . برای قابل اعتماد بودن نتایج حاصل از بکارگیری این روش ، لازم است که مخروطهای سایه افکن بدقت طراحی و ساخته شوند به نحوی که احتمال عبور نوترونهای مستقیم (از چشمه) از درون مخروطها قابل صرف نظر باشد . بطور کلی طراحی و ساخت هر مخروط بستگی به ابعاد چشمه و آشکارساز دارد . حجم مخروط از ماده کندکننده‌ای مثل پارافین یا پلی اتیلن پر شده و سطح جانبی آن نیز با کادمیوم پوشانده میشود . برای این مخروطها طولی برابر با ۵۰ سانتیمتر کفایت تا از رسیدن نوترونهای بدون برخورد به آشکارساز جلوگیری شود . برای اندازه گیری مولفه پراکندگی در پاسخ آشکارساز برای شرایط موجود در اتاق اندازه‌گیری CRE دو مخروط با طولهای یکسان ساخته شد که برای طول اندازه‌گیری مناسب بودند . وضعیت مخروط نسبت به چشمه و آشکارساز بسیار حائز اهمیت است . فاصله چشمه از سطح در معرض تابش مخروط باید بطور تجربی طوری تعیین شود که سایه ایجاد شده حتی المقدور در امتداد یال مخروط باشد .

در اندازه‌گیری‌های مربوط به این مقاله این فاصله ۱۰ سانتیمتر بدست آمد . همچنین مناسبترین فاصله

آشکارساز نسبت به مخروط تقریباً " برابر با درازای مخروط تعیین کردید . نکته مهم دیگر که در اندازه گیری مولفه پراکندگی باید مورد توجه قرار گیرد ، سطح مقطع سایه مخروط در محل استقرار آشکارساز است که نباید از دو برابر سطح مقطع آشکارساز بزرگتر باشد ، در غیر اینصورت از مقدار مولفه پراکندگی نوترونها از هوا که قسمت اعظم آن در جوار آشکارساز است ، کاسته خواهد شد (۲ و ۹) .

قانون عکس مجذور فاصله و کاربرد

آن در روش سایه مخروط

با توجه به اینکه این روش الزاماً " در فواصل بزرگتر از یک متر قابل تجزیه است ، تاثیر فاکتور تصحیح‌کننده $F_1(D)$ در معادله عمومی (۱) ناچیز بوده و مقدار آن تقریباً " برابر با یک است . با این نتیجه‌گیری و نیز از ادغام معادلات (۱) و (۴) میتوان به معادله زیر رسید :

$$C(D) = \frac{K}{(D+R_e)^2} (1-ND_0) + \frac{bD_0}{(D+R_e)^2} + \frac{aD_0}{(D+R_e)^2} \quad (5)$$

در این رابطه $b = L_s$ و $a = K_s$ ، در مورد آشکارسازهای کروی و جابجیه $D \gg R$ و اختلاف بین R_e و R کوچک است معادله بالا به شکل زیر تبدیل میشود .

$$C(D) = \frac{K}{(D+R_e)^2} (1-ND_0) + (a+b/D_0) \quad (6)$$

براحتی میتوان دریافت که جمله سوم سمت راست معادله (۶) میتواند سهم نوترونهای پراکنده شده در پاسخ کلی آشکارساز در فاصله D باشد ، پس :

$$S(D) D_0 = aD_0 + b \quad (7)$$

$$C(D) - S(D) = \frac{K}{(D+R_e)^2} (1-ND_0) \quad (8)$$

$$D \left\{ \frac{C(D)}{F_1(D)F_2(D)} \right\}^{\frac{1}{2}} = K^{\frac{1}{2}} - R \left\{ \frac{C(D)}{F_1(D)F_2(D)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

و استفاده از روش حداقل مربعات و همچنین بکار بردن شمارش‌های بدست آمده (جدول ۲) در فواصل

جدول ۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیری با روش سایه مخروط برای بدست آوردن مرکز موثر و حساسیت آشکارساز هر شمارش برای مدت زمان ۴۰۰ ثانیه می‌باشد.

D (cm)	S(D) x ۴۰۰	C(D) x ۴۰۰
۱۳۱/۲	۷۸۱	۲۰۲۷
۱۳۴/۲	۷۸۴	۱۹۳۳
۱۳۷/۲	۷۲۷	۱۹۲۱
۱۴۰/۲	۷۶۹	۱۸۷۸
۱۴۳/۲	۷۴۴	۱۸۴۶
۱۴۶/۲	۷۸۳	۱۷۵۴
۱۴۹/۲	۷۶۵	۱۷۱۴
۱۵۲/۲	۷۸۰	۱۶۳۵
۱۵۵/۲	۷۱۲	۱۶۱۶
۱۵۸/۲	۷۳۲	۱۶۳۳
۱۶۱/۲	۷۳۰	۱۵۳۴
۱۶۴/۲	۷۰۳	۱۵۴۳
۱۶۷/۲	۷۱۹	۱۵۱۴
۱۷۰/۲	۷۲۴	۱۴۹۷
۱۷۳/۲	۷۰۴	۱۴۵۷
۱۷۶/۲	۶۷۰	۱۴۲۳
۱۷۹/۲	۶۹۸	۱۴۱۷
۱۸۲/۲	۶۸۷	۱۳۱۳

در عمل ضخامت لایه هوا بین چشمه و آشکارساز D است و چون $D \gg R$ و $N \ll 1$ ، می‌توان نوشت:

$$e^{-ND} = e^{-ND_0} = 1 - ND_0$$

$$\{C(D) - S(D)\}^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{ND}{2}} = K^{-\frac{1}{2}} (D + R_e)$$

(۹)

شکل‌های ۱ و ۲ نمایش خطی معادلات (۷) و (۹) با استفاده از ۱۸ زوج شمارش S(D) و C(D) موجود در جدول ۱ می‌باشند که از طریق روش حداقل مربعات (least square technique) بدست آمده‌اند.

ب- مدل چند جمله‌ای یا پلی‌نومینال (Polynomial model) با ادغام معادلات

(۱)، (۲) و (۳) می‌توان نوشت:

$$\frac{C(D)D_0^2}{F_1(D)} = K(1 + AD_0 + SD_0^2) \quad (10)$$

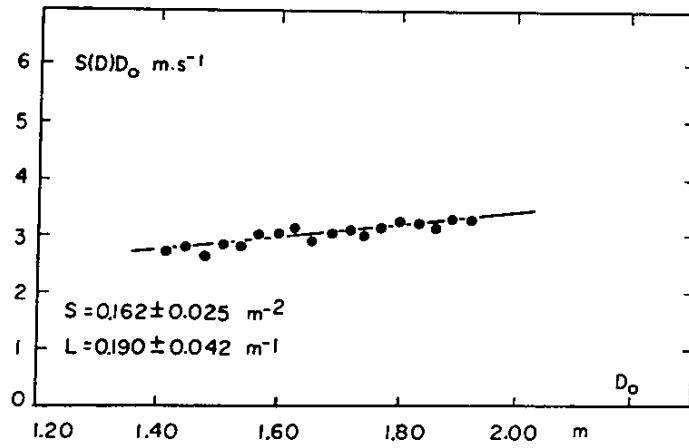
با استفاده از این مدل ضرایب تعیین‌کننده مقدار پراکندگی بطور مستقیم قابل محاسبه می‌باشند. در این مدل می‌توان شمارش‌های بدست آمده (جدول ۲) در فواصل $D > 1$ متر و $D < 1$ متر را بطور جداگانه یا همزمان بکار برد، با این تفاوت که در فواصل نزدیک نخست باید میزان شمارش در هر فاصله در برابر اثرات ناشی از حجم آشکارساز تصحیح گردد. در این شرایط عبارت سمت چپ معادله فوق تابع درجه دوم از فاصله است و ضرایب آنرا می‌توان بکمک روش ریاضی حداقل مربعات بدست آورد که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است (۸).

ج- مدل شوارتز (Schwartz model)

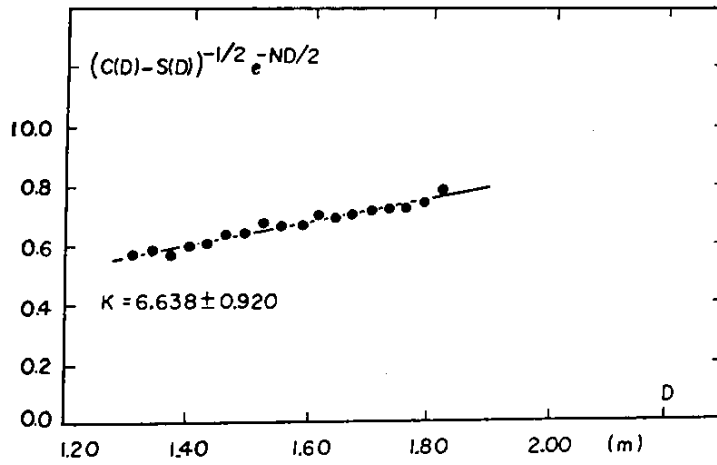
بر اساس نظر شوارتز، پاسخدهی آشکارساز در فواصل کوچک نسبت به موضع واقعی مرکز موثر بسیار حساس است (۲). حال با تبدیل معادله عمومی

(۱) به شکل:

مجید خوشنودی . روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی .



شکل ۱



شکل ۲

شکل‌های ۱ و ۲ - نمایش معادلات (۷) و (۹) است که بوسیله آنها ضرایب S ، L و K محاسبه گردیده است.

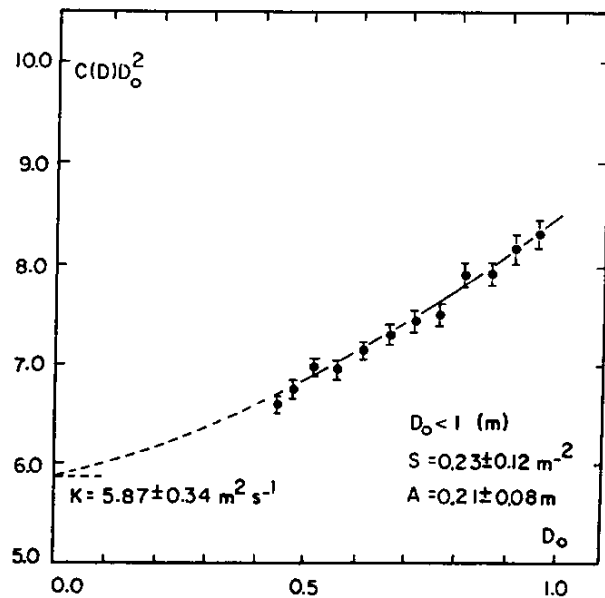
همراه مقادیر A و S فابیل ملاحظه است، خطای آماری (Statistic) نیز وارد میگردد. در این مقاله مقادیر A و S در معادله (۱۱) از طریق مدل چندجمله‌ای و بکاربردن شمارش‌های بدست آمده در

کوچکتر از یک متر، میتوان مشخصه ثابت و شعاع موثر آشکارساز را بدست آورد (شکل ۵). از مزیت های مهم این مدل اینست که مقدار خطا در هر نقطه نتیجه خطا در فاصله می باشد. در مواردیکه خطای

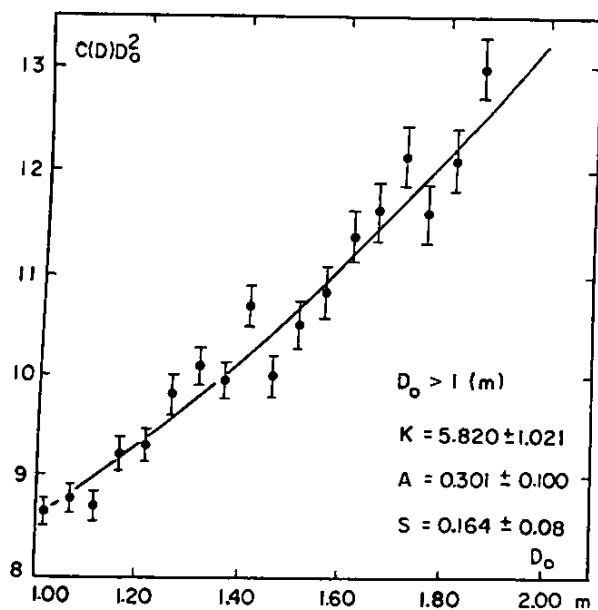
جدول ۲- شمارش‌های کلی بدست آمده (مجموع نوترونهاى بازتاب شده و مستقیم) در مدت زمان ۴۰۰ ثانیه بوسیله آشکارساز نوع ۹۵/۰۰۷۵ در شرایط موجود در اتاق اندازه‌گیری CRE.

N	D (cm)	C(D) × ۴۰۰	N	D (cm)	C(D) × ۴۰۰
۱	۱/۹	۱۸۳۱۵۵	۲۲	۷۶/۲	۴۲۳۴
۲	۲/۹	۱۵۳۰۵۶	۲۳	۸۱/۲	۳۹۰۶
۳	۳/۹	۱۲۹۶۱۷	۲۴	۸۶/۲	۳۵۶۷
۴	۴/۹	۸۷۲۵۹	۲۵	۹۱/۲	۳۳۴۸
۵	۹/۹	۶۲۸۵۵	۲۶	۹۶/۲	۳۰۸۰
۶	۱۲/۹	۴۷۷۵۹	۲۷	۱۰۱/۲	۲۷۹۲
۷	۱۵/۹	۳۷۷۹۹	۲۸	۱۰۶/۲	۲۷۱۶
۸	۱۸/۹	۳۰۱۲۰	۲۹	۱۱۱/۲	۲۵۲۳
۹	۲۱/۹	۲۴۸۱۸	۳۰	۱۱۶/۲	۲۴۴۸
۱۰	۲۴/۹	۲۱۰۸۷	۳۱	۱۲۱/۲	۲۳۳۴
۱۱	۲۷/۹	۱۸۱۰۹	۳۲	۱۲۶/۲	۲۱۳۳
۱۲	۳۰/۹	۱۵۵۴۵	۳۳	۱۳۱/۲	۲۱۳۲
۱۳	۳۳/۹	۱۳۶۹۰	۳۴	۱۳۶/۲	۱۸۵۶
۱۴	۳۶/۹	۱۲۲۱۳	۳۵	۱۴۱/۲	۱۸۳۲
۱۵	۴۱/۲	۱۰۵۵۵	۳۶	۱۴۶/۲	۱۷۶۷
۱۶	۴۶/۲	۸۷۱۹	۳۷	۱۵۱/۲	۱۷۴۱
۱۷	۵۱/۲	۷۵۷۹	۳۸	۱۵۶/۲	۱۵۲۹
۱۸	۵۶/۲	۶۶۰۳	۳۹	۱۶۱/۲	۱۶۴۹
۱۹	۶۱/۲	۵۸۲۶	۴۰	۱۶۶/۲	۱۴۸۴
۲۰	۶۶/۲	۵۱۳۷	۴۱	۱۷۱/۲	۱۴۶۷
۲۱	۷۱/۲	۴۷۷۵	۴۲	۱۷۶/۲	۱۴۹۰

مجید خوشنودی . روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی

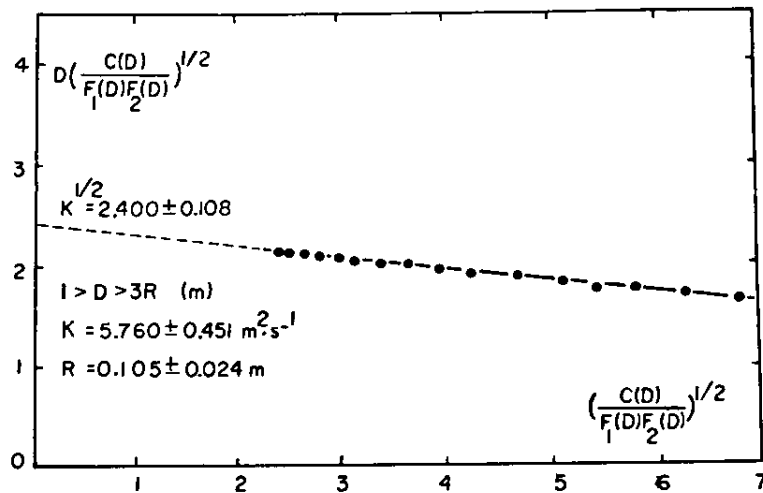


شکل ۳



شکل ۴

شکلهای ۳ و ۴ - منحنی‌های مدل چند جمله‌ای به ترتیب برای فواصل کوچکتر و بزرگتر از یک متر برای بدست آوردن مولفه‌های پراکندگی نوترون در محیط اندازه‌گیری و مشخصه ثابت K .



شکل ۵- نمایش تابعیت خطی مدل شوارتز و محاسبه مرکز موثر و K

با توجه باین فرض معادله (۱) بشکل زیر مرتب میگردد:

$$\frac{C(D) D_0^2}{F_1(D) (1+AD_0)} = K (1+SD_0^2) \quad (12)$$

چنانکه دیده میشود، حاصلضرب میزان شمارش (تصحیح شده دربرابر اثرات پراکندگی از هوا و نقطه‌ای نبودن آشکارساز) و مجذور فاصله (D_0^2) تابعی خطی از فاصله است. دراین معادله، برطبق محاسبات کامپیوتری و استفاده از روش مونت کارلو $A \approx N$ است. در شکل (۶) تابعیت نقاط از معادله خطی (۱۲) بخوبی آشکار است. نقاط نشان داده شده با استفاده از شمارش‌های جدول (۲) و در محدوده $I > D > 3R$ متر محاسبه گردیده و ضرایب خط از طریق روش ریاضی حداقل مربعات بدست آمده است (۶ و ۱۰).

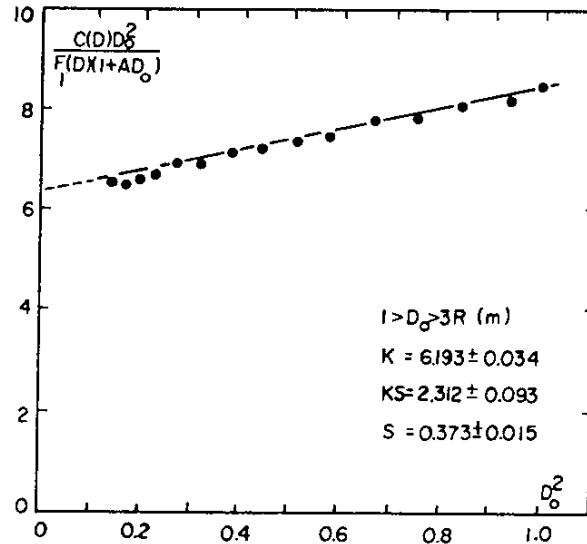
هم مدل مستقل از پراکندگی (scatter-free model): این مدل اولین بار توسط

فواصل بزرگتر از یکمتر محاسبه گردیده است. همچنین مقدار δ برابر با مقدار پیشنهادی اکستون (Axton) یعنی $\frac{2}{3}$ می باشد (۳). یک مزیت دیگر این مدل کاربرد آن در محاسبه مرکز موثر هر آشکارساز نوترونی دیگر صرفنظر از شکل هندسی آنست (۲). برای این منظور کافیت که فاصله مراکز چشمه و آشکارساز از سه برابر شعاع معادل آشکارساز بزرگتر باشد، به نحوی که مقدار $F_1(D)$ تاثیرناچیزی در محاسبات داشته باشد.

د- مدل آیزنهاور، شوارتز و جانسون (Eisenhauer, Schwartz and Johnson model): براساس این مدل سهم نوترونیهای پراکنده شونده از هوا در پاسخدهی آشکارساز کوچک بوده و ضریب تصحیح کننده $F_2(D)$ را میتوان بشکل عوامل ضریب زیر در نظر گرفت:

$$F_2(D) = 1 + AD_0 + SD_0^2 \approx (1 + AD_0) (1 + SD_0^2)$$

مجید خوشنودی . روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی



شکل ۳- نمایش تابعیت خطی مدل آیزنهاور، شوارتز و جانسون و ضرایب حاصل از آن.

$F_3(D)$ است. با بکاربردن روش حداقل مربعات و استفاده از شمارش‌های بدست آمده در فواصل ۱۲/۳، ۱۳/۳ و ۱۴/۳ سانیمتری (جدول ۲) عرض از مبدا (K) و شیب $(K\delta)$ خط مزبور محاسبه و نتایج نهایی در جدول ۳ نشان داده شده است.

روش اندازه‌گیری

الف- انتخاب آشکارساز: در این مقاله کلیه شمارش‌ها با استفاده از یک آشکارساز کروی دزمعادل، مدل ۹۵/۰۰۲۵ و ساخت کارخانه Nuclear Enterprise استخراج گردیده است. در مرکز این آشکارساز یک اتاقک تناسی کروی به قطر ۳۲ میلی‌متر قرار دارد که با گازهای ^3He ، kV و با فشارهای جزئی ۲۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال پر شده است. این اتاقک نسبت به نوترونهای حرارتی حساس است و از اینرو بوسیله یک کره پلی اتیلن به شعاع ۱۰/۴

هانت (Hunt) پیشنهاد گردید (۲). او اظهار میدارد که در فواصل خیلی کوچک بین چشمه و آشکارساز اثرات پراکندگی در پاسخ عملاً ناچیز است و با استفاده از میزان شمارش در سه نقطه از نزدیکترین نقاط میتوان مشخصه ثابت چشمه آشکار-ساز و بدنبال آن حساسیت و نیز مقدار δ را بدست آورد. اینک با فرض $F_2(D) \approx 1$ و اینکه مراکز هندسی آشکارسازهای کروی برهم منطبق‌اند، میتوان از ترکیب معادلات (۱) و (۲) نتیجه گرفت:

$$C(D) D_0^2 = K \{1 + \delta F_3(D)\} \quad (13)$$

که در این معادله:

$$F_3(D) = \frac{2D_0^2}{R^2} \{1 - (1 - R^2/D_0^2)^{1/2}\} - 1$$

عبارت سمت چپ معادله (۳) تابعی خطی از

جدول ۳- نتایج مدلهای گوناگون در فواصل دور و نزدیک که در آزمایشگاههای CRE و PTB حاصل گشتهاند.
 در این جدول علامت (*) مشخصکننده فرایندی است که از طریق مدلهای دیگر و یا بطور مستقل محاسبه شدهاند.

مدل	متر $D_0 < 1$					متر $D_0 > 1$					
	$A(m^{-1})$	$S(m^{-2})$	R	δ	$\epsilon(CRE)$	$\epsilon(PTB)$	$A(m^{-1})$	$S(m^{-2})$	$R_g(cm)$	$\epsilon(CRE)$	$\epsilon(PTB)$
سایه مخروط	-	-	-	-	-	-	۰/۱۸۱	۰/۱۴۲	۱۴/۴	۰/۲۶۰	۰/۲۶۶
چند جمله‌ای	۰/۲۱۰	۰/۲۳۰	-	$\frac{1}{4}$ *	۰/۲۳۰	-	$\pm 0/042$	$\pm 4/3$	$\pm 0/040$	$\pm 0/004$	
	$\pm 0/080$	$\pm 0/120$	-	-	$\pm 0/013$	-	۰/۳۰۱	۱/۱۶۴	۰/۲۲۸	۰/۲۴۲	
شوارتزر	۰/۲۰۱ *	۰/۱۶۴ *	۱۰/۵	$\frac{1}{4}$ *	۰/۲۲۶	-	-	-	-	-	
	$\pm 0/100$	$\pm 0/080$	$\pm 2/4$	-	$\pm 0/020$	-	-	-	-	-	
آیزنهاور، شوارتزر و جاسون	۰/۰۰۹ *	۰/۲۷۳	-	$\frac{1}{4}$ *	۰/۲۴۲	۰/۲۴۸	۰/۰۰۹ *	-	۰/۲۷۳	-	
	-	$\pm 0/015$	-	-	$\pm 0/003$	$\pm 0/001$	-	$\pm 0/010$	۰/۰۰۶	-	
مستقل از پراکندگی	-	-	-	$\pm 0/0407$	۰/۲۴۱	-	-	-	-	-	
				$\pm 0/043$	$\pm 0/003$	-	-	-	-	-	

مجید خوشنودی . روش کالیبره کردن آشکارسازهای نوترونی مجهز به کندکننده کروی

۵ × (متر) {۷} بود استفاده کردید .
ج - سیستم شمارش : پالسهای ایجاد شده در آشکارساز ، پس از حذف پالسهای پرتوکامای حاصل از چشمه آمرسیوم - برلیوم که در سیستم الکترونیکی آشکارساز صورت میگیرد ، بوسیله یک سیم رابط مخصوص به یک سیستم شمارشگر - زمان - سنج واقع در خارج اتاق اندازهگیری تغذیه میگردد . با استفاده از این سیستم فاصله زمانی کلیه شمارشها ۴۰۰ ثانیه انتخاب گردید .
د - سیستم تغییر فاصله : تغییر فاصله چشمه تا آشکارساز از طریق حرکت انتقالی آشکارساز به روی یک ریل مدرج به طول دو متر امکان پذیر بود .

یافتهها و بررسی آنها

در جدول ۳ نتایج حاصل از هر مدل همراه با تعدادی از نتایج که در آزمایشگاه دیمتری استاندارد PTB بدست آمده نشان داده شده است . چنانکه دیده میشود ، نتایج مربوط به چند جمله‌ای ، شوارتز ، آیزنهاور و همکاران و هانت گویای سازگاری آنها با اختلاف حداکثر ۵/۵٪ است . در حالیکه مدل‌های سایه مخروط و چند جمله‌ای که در اصل برای فواصل بزرگتر از یک متر معادل می‌باشند ، دارای اختلاف ۱۴/۴٪ هستند . بهرحال صرفنظر از خطای آماری که خود یکی از عوامل ایجاد ناسازگاری است ، علل دیگر میتوان ذکر نمود که باعث دوری نتایج در مدل میگردد .

در اندازهگیری پاسخ نسبت به نوترونیهای پراکنده شده از هوا و جدارهای محیط اندازهگیری که با استفاده از مخروطهای سایه افکن انجام گرفت ، پاسخهای بدست آمده از مقدار واقعی آن (سهم آن در پاسخ کلی) کمتر است و این خود بدلیل بزرگ بودن سطح مقطع سایه در موضع آشکارساز نسبت به سطح مقطع آشکارساز می‌باشد . بهرحال در محاسبات

سانتیمتر احاطه گردیده است . حداقل فاصله اتاقت و قسمت پلی اتیلن یک لایه کادمیوم قرار داده شده است .

ب - انتخاب چشمه : هنگامیکه در کالیبره کردن دقیق دستگاههای نوترون از چشمه‌های نوترون استفاده میگردد ، باید قدرت چشمه دقیقاً معلوم باشد . علاوه بر آن میزان نشر نوترون باید به اندازه‌ای باشد تا بتواند محدوده بالایی طیف اندازهگیری آشکارساز را تا یک فاصله مشخص بین چشمه و آشکارساز تامین نماید . درحقیقت در فواصل $D < 2R$ خطای زیاد موجود در ضریب δ میتواند قانون عکس مجذور فاصله را برهم زند (۲) . بنابراین این برای اجتناب از این خطا باید قدرت چشمه به اندازه‌ای باشد تا بتواند در فواصل $D > 2R$ ناحیه‌ی بالا در آشکارساز را بپوشاند . برای القاء حدود پائین دز در آشکارساز ، میتوان فاصله آشکارساز و چشمه را افزایش داد . تعیین محدوده فاصله برای این حالت هنگامی ضروریست که سهم نوترونیهای ناشی از پراکندگی در میزان شمارش کلی بطور غیر قابل قبولی افزایش یابد . در شرایطی که اتاقت اندازهگیری دارای ابعاد وسیع و اهداف تجربیه بدست آوردن ضرایب R_e ، A ، S و بررسی سازگاری نقاط بدست آمده با قانون عکس مجذور فاصله در فواصل دور و نزدیک می‌باشد ، لازم است از دو چشمه (از یک نوع) با قدرتهای متفاوت استفاده شود . در این حالت کاربرد چشمه قویتر در فواصل دور - بعثت زیاد بودن تعداد نوترونها در واحد سطح - میتواند اثر خطای آماری (استاتیستیک) ناشی از شمارش را کاهش داده و در ضمن اثرات نسبی پراکندگی در پاسخ کلی رانیز پائین نگهدارد .
در تجربیات مربوط به این مقاله از یک چشمه آمرسیوم - برلیوم با میزان نشر $\frac{6}{\text{Sec}} \times 10^6$ که مناسب ابعاد اتاق اندازهگیری { (متر) ۴ × (متر) ۳

استوار است. در این حالت مرجع تعیین دز واقعی یک چشمه یا شنا بدهنده با مختصات فیزیکی کاملاً معلوم است که از طریق آنها تعداد نوترون‌ها در واحد سطح و در نهایت دز واقعی در دسترس می‌باشد.

در شرایطی که برای کالیبره کردن از یک چشمه ایزوتروپی استفاده می‌گردد، قانون عکس مجذور فاصله رابطه بین پاسخ دستگاه و فاصله آن از منبع انتشار نوترون را تعیین می‌کند. برای وارد نمودن قانون مذکور در مسیر کالیبره کردن و استفاده از آن در محاسبه ضرایب ارتباط دهنده دز واقعی و پاسخ کلی آشکارساز، لازم است پاسخ آشکارساز در برابر چند عامل اساسی تصحیح گردد:

الف - حجم آشکارساز

از محل چشمه، یک آشکارساز غیرنقطه‌ای که در فاصله معین از آن قرار دارد، با زاویه فضایی مشخص رویت می‌گردد که نتیجه آن دریافت نوترون‌های اضافی از طریق حجم آشکارساز است. در مورد آشکارسازهای کروی دارای کندکننده، ضریب $F_1(D)$ مقدار نسبی انحراف پاسخ را از مقدار آن با فرض نقطه‌ای بودن آشکارساز بدست می‌دهد.

ب - عوامل محیطی

در محیطی که اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد، دو منشأ اساسی پراکنده کردن نوترون وجود دارد که باعث افزایش پاسخ آشکارساز نسبت به مقدار مشابه آن در شرایط خلأ می‌گردند. این دو منشأ عبارتند از هوا و جدارهای محیط اندازه‌گیری: ۱- هوا؛ در اثر برخورد گوی‌وار بین نوترون‌ها و ملکولهای هوا، همواره تعدادی از نوترون‌ها به روی آشکارساز بازتاب شده و سهمی از پاسخ را به خود اختصاص می‌دهند. اندازه مطلق این مولفه با عکس فاصله چشمه تا آشکارساز نسبت مستقیم دارد. ۲- جدارهای اتاق اندازه‌گیری - دیوارها، سقف و کف اتاق اندازه‌گیری

مربوط به این مدل که نتیجه اندازه‌گیریها در اتاق اندازه‌گیری کوچک CRE $\{4 \text{ (متر)} \times 5 \text{ (متر)} \times 7 \text{ (متر)}\}$ است، این عامل سبب ایجاد خطا در نتایج گردید. برای نشان دادن تاثیر این خطا، چنانچه به پاسخ آشکارساز نسبت به نوترون‌های پراکنده شده ۵٪ افزوده شود - که این تنها ۲٪ پاسخ کلی است. در محاسبه K (یا E) که از طریق معادلات (۶) و (۹) انجام می‌گیرد، ۱۰٪ کاهش بوجود می‌آید. در اینجا لازم به توضیح است که مدل سایه مخروط و چند جمله‌ای تنها در اتاقهای اندازه‌گیری با شعاع $r_c > 10 \text{ m}$ که کاملاً با هم سازگارند و تاکنون دلیلی برای ناسازگاری آنها در اتاقهای کوچکتر پیدا نشده است. از اینرو میتوان گفت مورد اخیر یکی از دلایل اختلاف در میان نتایج در مدل در شرایط اندازه‌گیری آزمایشگاه CRE بوده است.

از موارد قابل توضیح دیگر مربوط به مدل آیزنهاور و همکاران است که نتایج حاصل از آن دارای اختلاف زیاد با نتایج مدل‌های دیگر در فواصل بزرگتر از یک متر است و این شاید به سبب کوچک در نظر گرفتن مقدار A در مدل مذکور باشد که آیزنهاور آنرا بر اساس نتیجه‌گیری از $L \approx 2N$ پیشنهاد نموده است. مقادیر A که با استفاده از مدل‌های سایه مخروط و چند جمله‌ای بدست آمده حاکی از آن است که A چندین برابر مقدار بکار رفته آن در مدل آیزنهاور است. هانت اظهار میدارد، به احتمال زیاد مولفه‌ای از پراکندگی وجود دارد که در ضمن عدم ارتباط با هوای درون اتاق اندازه‌گیری دارای بستگی $\frac{1}{D_0}$ با مولفه کلی پاسخ است (۲).

نتیجه‌گیری

چنانکه دیده شد، اساس کالیبره کردن وسائل حساس به پرتو نوترون بر مبنای پیدا کردن یک رابطه بین دز واقعی و دز بدست آمده از وسیله اندازه‌گیری

کندکننده نوترون برهم منطبق و یا بسیار نزدیک به یکدیگرند .

۴- در شرایطی که پراکندگی ناشی از جدارهای اتاق اندازه‌گیری بزرگ است مدل آیزنهاور با دقت خوب ، نتایج سازگاری با دیگر مدلها در فواصل $D_0 < 1$ متر خواهد داشت .

۵- در فواصل بسیار نزدیک بین چشمه و یک آشکار ساز نوترون ابعاد بزرگ آشکارساز نسبت به چشمه سبب میشود که بخش بزرگی از محیط اندازه‌گیری در سایه آن قرار گیرد و این خود باعث کاهش قابل توجهی از اثرات پراکندگی در پاسخ آشکارساز میگردد . از طرف دیگر کثرت تعداد نوترونها در واحد سطح در چنین فواصل نزدیک اثر نسبی پراکندگی را خنثی نموده و عدم شرکت آنها در محاسبات در دقت نتایج تاثیر ناچیزی بر جای خواهد گذاشت از این رو مدل مستقل از پراکندگی ساده‌ترین راه برای کالیبره کردن و محاسبه ضریب تاثیرپذیری نوترون در آشکارسازهای کروی است . محاسبه بازده (efficiency) آشکارساز بکار برده شده در این تجربیات که با استفاده از این مدل و آنکه بر طبق دستورالعمل " کالیبره کردن " کارخانه سازنده انجام شده نشان داد که نسبت دومی به اولی ۱/۱ است و این گویای این نکته بود که کارخانه سازنده ، این دستگاه را طوری تنظیم نموده است تا مقداری مازاد بر مقدار دقیق دز نشان دهد .

سبب توزیع ثابتی از نوترونها پراکنده شده در ناحیه مرکزی اتاق می‌شوند . نتیجتاً " ، قسمت ثابتی از پاسخ آشکارساز ناشی از تاثیر این نوترونها است .

ج - مرکز موثر

مرکز موثر هر آشکارساز نوترون مجهز به کندکننده ، نقطه‌ای است که محل تاثیر نوترونهای سریع را پس از کند شدن نشان میدهد . در آشکارسازهای کروی این نقطه بر مرکز هندسی آشکارساز منطبق است .

با توجه به عوامل یاد شده ، قانون عکس مجذور فاصله را میتوان به شکل پنج مدل مورد استفاده قرار داد و با در نظر گرفتن شرایط هر مدل بازده (efficiency) و ضرایب دیگر را بدست آورد . با مروری از مقادیر حاصل از مدلها و مقایسه آنها در میدان خطاهای همراه آنها میتوان نتیجه‌گیری کرد :
۱- برای کالیبره کردن هر آشکارساز نوترون مجهز به کندکننده صرفنظر از شکل هندسی و نسوع آن میتوان مدل سایه مخروط را بکار گرفت و تمام کمیت‌های شرکت‌کننده در پاسخ آشکارساز را محاسبه نمود .

۲- در محیطهای اندازه‌گیری بزرگ و جائیکه میزان پراکندگی (Scattering) نوترون پائین است ، مدل چندجمله‌ای را میتوان جایگزین مدل سایه مخروط نمود . مشروط بر اینکه اندازه‌گیری‌ها در فواصل بزرگتر از یک متر انجام گیرد .

۳- با استفاده از مدل شوارتز میتوان نشان داد که مراکز موثر و هندسی آشکارسازهای کروی مجهز به

References

1. ICRU, Data for Protection Against Ionizing Radiation from External Sources, Publication 21, (1973).
2. J.B. Hunt, The Calibration of Neutron Sensitive Spherical Devices, Radiation Protection Dosimetry 8, 239 (1984).
3. E.J. Axton. The Effective Centre of a Moderating Sphere when Used as an Instrument for Fast Neutron Flux Measurement, J. Nucl. Energy 26, 581-583 (1973).
4. K.G. Harrison, The Calibration of Neutron Detectors with Spherical Moderators. Nucl. Instrum. Methods, 184, 595-597 (1981).
5. A.K. Savinskii and I.V. Filyushkin. An Estimate of the Contribution by Neutrons Scattered in Enclosed Rooms to a Total Radiation Dose in Neutrons Monitoring for Radiation Protection Purposes, STI/PUB/318 (Vienna : IAEA) Vol. I, PP. 211-222 (1973).
6. C.M. Eisenhauer and R.B. Schwartz. The Effect of Room-Scattered Neutrons on the Calibration of Radiation Instruments. Proc. Fourth Symp. on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, München Neuherberg, June 1-5, 1981 (Luxembourg : CEC) EUR 7448, Vol. II, PP. 421-430 (1981).
7. C.M. Eisenhauer and R.B. Schwartz. Analysis of Neutron Room Return, In Proc. Eighth DOC workshop on Neutron Dosimetry, Louisville, Kentucky, June 18-19, PNL-SA-9950, PP. 171-180 (1981).
8. C.M. Eisenhauer, J.B. Hunt and R.B. Schwartz. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 10, N. 1-4 PP. 43-57 (1985).
9. J.B. Hunt, The Calibration and Use of Long Counter for the Accurate Measurement of Neutron Flux Density, NPL. Report, RS (EXT) 5, National Physical Laboratory, Teddington, England (1976).
10. R.B. Schwartz and C.M. Eisenhauer, Procedures for Calibrating Neutron Personnel Dosimeters, N.B.S. Special Publication 633, National Bureau of Standards (1982).

THE CALIBRATION OF NEUTRON DETECTORS EQUIPPED WITH SPHERICAL MODERATORS*

M. Khoshnoodi

Radiation Protection Department
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract

The measurements of variation of response of a neutron spherical remmeter, irradiated by an Am-Be neutron source of known emission rate, as a function of distance are investigated in this paper. The variations are then analyzed by five different models based upon an original model and that the source-detector characteristic constant along with the factors related to the contribution of walls and air scattered neutrons into the response of the detector are calculated. Similar measurements were also repeated at PTB in west Germany and the results are compared with those obtained at CRE in Italy.

* A Part of this paper, co-authored with Mr. Marco Ferretti from ENEA, Italy, was presented at 24th Italian National Congress on Radiation Protection held in Torino, in 1985.