

شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامتر نسبت کادمیوم در پایل پلی اتیلن

اکبر عبدی سرای^۱، حسین ذکی دیزاجی^{۲*}

۱- استادیار، دانشگاه ارومیه، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۵/۰۶/۰۱، پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۷)

چکیده

یک مواد سبک مانند پلی‌اتیلن یکی از محیط‌های کند کننده نوترون است. برای کالیبراسیون دزیمترها و آشکارسازهای نوترونی می‌توان از پایل پلی‌اتیلن استفاده نمود. پایل پلی‌اتیلن به عنوان منبع برای کند نمودن نوترون‌های سریع در مرکز تحقیقات طراحی و استفاده می‌شود. ابعاد این پایل ۲۴۰ cm در طول، ۲۰۰ cm در عرض و ۲۲۰ cm در ارتفاع است. یک چشمه نوترونی 241Am-Be با شدت 1.1×10^7 n/s در مرکز این پایل قرار داده شده است. کانال‌های اندازه‌گیری در هر قسمت از پایل با برداشتن بلوک پلی‌اتیلنی امکان‌پذیر است. توزیع فضایی شار نوترون حرارتی و سریع به صورت تجربی با استفاده از آشکارساز نوترونی BF3 و پوشش کادمیومی اندازه‌گیری شد. به منظور حصول بیشترین جمعیت نوترون حرارتی، این پایل با کد MCNPX-2.7.0 شبیه‌سازی شد و نتایج حاصل تطابق خوبی با مقادیر تجربی داشت. کیفیت میدان نوترون حرارتی در پایل با اندازه‌گیری نسبت کادمیوم مشخص گردید. با استفاده از آشکارساز یدور سدیم، پرتوهای گاما، ناشی از چشمه نوترونی در راستاهای مختلف داخل پایل اندازه‌گیری شد.

کلیدواژه‌ها: پایل، نوترون حرارتی، نسبت کادمیوم، کالیبراسیون، ناحیه مجانبی

Simulation and Measurement of Cadmium Ratio Parameter in the Polyethylene Pile

A. A. Saray, H. Zaki Dizaji*

Imam Hossein University

(Received: 22/08/2016; Accepted: 17/12/2016)

Abstract

A light element such as polyethylene is one of the neutron moderators. Polyethylene pile can be used for calibration of neutron dosimeters and detectors. The polyethylene pile was designed as a source for slowing down the fast neutrons and used in technology centers. Dimensions of the pile are 240 cm in length, 200 cm in width and 220 cm in height. 241Am-Be neutron source with intensity of 1.1×10^7 n/s was placed in center of the pile. Measurement channels are available at any point of the pile by removing the polyethylene blocks. Spatial distribution of thermal and fast neutron flux was measured using BF3 neutron detector and cadmium cover. In order to obtain maximum thermal neutron population, this pile was simulated with MCNPX-2.7.0 code, and the results were in good agreement with experimental results. The quality of thermal neutron field was characterized by the cadmium ratio. Using a NaI(Tl) detector, gamma rays due to neutron source was measured in different directions inside the pile.

Keywords: Pile, Thermal Neutron, Cadmium Ratio, Calibration, Asymptotic Region

*Corresponding Author E-mail: kpzaki@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

کالیبراسیون یا سنج‌بندی، در واقع مقایسه پاسخ یک ابزار اندازه‌گیری با کمیت مرجع در شرایط کنترل شده و استاندارد، برای تعیین خطای موجود در مقادیر اندازه‌گیری شده است. کالیبراسیون آشکارسازها یا دستگاه‌های اندازه‌گیری پرتوهای یون‌ساز که اصطلاحاً پرتوسنج یا دزیمتر نامیده می‌شود، به علت اندازه‌گیری پرتوگیری شغلی پرتوکاران و یا تعیین میزان پرتو در محیط کار، در حفظ سلامت و ایمنی کارکنان نقش اساسی دارد [۱ و ۲]. به دلیل اثرات زیست‌شناختی بیشتر نوترون‌ها نسبت به فوتون‌ها، دزیمتری آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. از طرفی برای ارزیابی و اندازه‌گیری در معادل نوترونی افراد و محیط در معرض تابش، باید از وسایل و تجهیزات کالیبره شده استفاده کرد. کالیبراسیون دزیمترهای فردی و محیطی نوترون باید در میدان‌های استاندارد مرجع صورت پذیرد [۳]. در کشورمان تاکنون، بیشتر دستگاه‌ها و تجهیزاتی که با تابش‌های نوترون سر و کار دارند (مانند تجهیزات پزشکی و صنعتی) برای کالیبراسیون و استانداردسازی، به کشورهای خارجی فرستاده می‌شوند یا با تجهیزات و امکانات غیر استاندارد در داخل کشور کالیبره می‌شوند. همچنین به طور معمول فعالیت‌های مرتبط با علوم، فناوری و صنعت هسته‌ای، نیازمند سامانه پرتودهی نوترون کالیبره شده هستند، وجود مجموعه استاندارد که بتواند میدان نوترون حرارتی کالیبره شده تولید نماید، ضرورت داشته و می‌تواند در رفع نیازهای کشور مفید و مؤثر واقع شود.

در ایران، تنها مرکز کالیبراسیون برای دزیمترهای گاما و نوترون، آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDL) سازمان انرژی اتمی واقع در شهر کرج است. یکی از وظایف مهم آزمایشگاه‌های دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDL) کالیبراسیون استاندارد کلیه دستگاه‌های سنجش پرتو در کاربردهای مختلف مانند حفاظتی، پزشکی و صنعتی است. کالیبراسیون سامانه‌های دزیمتری موجود در آزمایشگاه‌های دزیمتری استاندارد ثانویه با آزمایشگاه‌های استاندارد اولیه یا آزمایشگاه دزیمتری آژانس بین‌المللی انرژی اتمی مرتبط بوده و هر سه سال یک بار دزیمترهای استاندارد موجود در این بخش کالیبره می‌شوند. در مرکز کالیبراسیون واقع در کرج، برای دزیمتری نوترون از یک چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ داخل یک تانک آب استفاده می‌کنند و محیط کند کنندگی نوترون، آب سبک بوده که یک سیال است. یکی دیگر از ابزارها و تجهیزات کالیبراسیون که مشخصات متفاوت، به ویژه محیط کند کنندگی و شکل غیر سیال داشته باشند می‌تواند مورد استفاده واقع شده و مکمل قبلی باشد. پایل پلی‌اتیلنی یکی از ابزارهای ضروری و مفید در این حوزه است.

۲. بخش تجربی

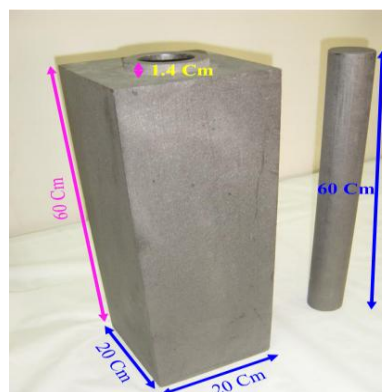
پایل پلی‌اتیلنی یکی از ابزارهای مفید برای تولید نوترون‌های حرارتی و کالیبراسیون آشکارسازها و دزیمترهای نوترونی است. مجموعه پایل پلی‌اتیلنی، برای اولین بار با طراحی جدید در بخش مهندسی ساخته شد. با ساخت این پایل پلی‌اتیلنی به عنوان دومین آزمایشگاه دزیمتری ثانویه، می‌توان تولید میدان نوترون حرارتی، کالیبراسیون آشکارسازها و دزیمترهای نوترونی را در آن انجام داد. محیط کند کنندگی در این ابزار، پلی‌اتیلن و مواد آلی سبک است که از لحاظ خواص نوترونی و کند کنندگی، کاملاً متفاوت با محیط آب است.

پایل پلی‌اتیلنی در واقع مجموعه‌ای از بلوک‌های پلی‌اتیلنی است که با یک طراحی خاص بر روی هم چیده می‌شوند تا بیشترین نوترون حرارتی تولید شود. اگر در داخل پایل پلی‌اتیلنی در نقاط مختلف از یک یا چند چشمه نوترونی استفاده شود، از پایل پلی‌اتیلنی به سیگما پایل نیز یاد می‌شود. تعدادی از پایل‌های استاندارد موجود در سطح جهان که برای کالیبراسیون آشکارسازها و دزیمترهای نوترونی استفاده می‌شود در جدول (۱) آورده شده است [۴-۹]. به منظور حصول بیشترین جمعیت نوترون حرارتی، شبیه‌سازی کد مونت کارلوی MCNPX-2.7.0 در مراحل طراحی مفهومی انجام گرفت و سپس پایل پلی‌اتیلنی ساخته شد. بلوک‌های پلی‌اتیلنی لازم برای ساخت پایل، در دو سایز اصلی و به ابعاد $20 \times 20 \times 20$ و $60 \times 20 \times 20$ cm می‌باشند که در شکل‌های (۳-۱) مشخصات کامل آن‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود این بلوک‌ها توخالی هستند که با استوانه‌های پلی‌اتیلنی، که به راحتی داخل بلوک پلی‌اتیلنی حرکت می‌کنند، پر می‌شوند. قطر خارجی استوانه‌ها با قطر داخلی حفره بلوک‌ها (به قطر تقریبی $3/1$ سانتی‌متر) و همین‌طور ارتفاع آن‌ها نیز با ارتفاع بلوک‌ها برابر است.

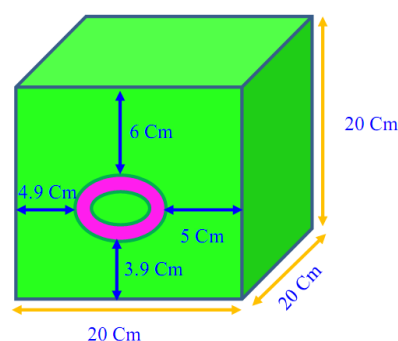
جدول ۱. پایل‌های استاندارد موجود در سطح جهان به عنوان مرکز کالیبراسیون آشکارسازها و دزیمترهای نوترونی

کشور	ابعاد (cm)	چشمه نوترونی در داخل پایل	تعداد چشمه‌های نوترونی	شدت چشمه (GBq)
ژاپن (KEK)	$250 \times 190 \times 190$	$^{241}\text{Am-Be}$	۱	۴۰
جمهوری چک	$195 \times 195 \times 200$	$^{239}\text{Pu-Be}$	۶	0.458
ژاپن	$164 \times 150 \times 150$	$^{241}\text{Am-Be}$	۲	۵۲
کره جنوبی	$150 \times 150 \times 150$	نوترون ژنراتور و $^{241}\text{Am-Be}$	۱	۳۷
برزیل	$120 \times 120 \times 120$	$^{241}\text{Am-Be}$	۴	۵۹۶

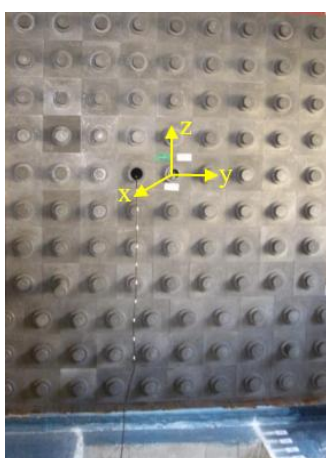
این بلوک‌های پلی‌اتیلنی بر روی سطح یک سکوی بتون مسلح به ابعاد $250 \times 215 \times 50 \text{ cm}^3$ چیده شده‌اند. ارتفاع سکوی بتونی ۵۰ cm هست که ۴۰ cm از آن داخل زمین و فقط ۱۰ cm از آن، بالاتر از کف سالن است. از آنجایی که بلوک‌های پلی‌اتیلنی کاملاً شکننده هستند روی سکوی بتونی با سنگ‌های گرانیت به ضخامت ۲ cm پوشانده شده است تا سطحی کاملاً صاف و یکپارچه به دست آید. بعد از تکمیل شدن سکوی بتنی، بلوک‌های پلی‌اتیلنی در طی چندین مرحله، بر روی آن چیده می‌شوند و در نهایت پایل به صورتی که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ساخته می‌شود.



شکل ۱. بلوک مکعبی بزرگ و میله استوانه‌ای پلی‌اتیلنی



شکل ۲. مشخصات بلوک مکعبی کوچک



شکل ۴. پایل استاندارد پلی‌اتیلنی

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود پایل پلی‌اتیلنی از دو قسمت به ابعاد $240 \times 200 \times 60 \text{ cm}^3$ و $240 \times 180 \times 160 \text{ cm}^3$ ساخته شده است. چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ با شدت 10^7 n/s در ردیف ۱/۱ همان‌طور که در شکل (۴ و ۶) مشاهده می‌شود، در ردیف هفتم از بلوک‌های پلی‌اتیلنی در داخل پایل قرار دارد. این چشمه در درون کپسولی از جنس استیل به قطر خارجی و ارتفاع به ترتیب ۳ cm و ۶ cm قرار گرفته است و برای حفاظت و ایمنی بیشتر، این مجموعه در درون محفظه‌ای از آهن به قطر $4/3 \text{ cm}$ و طول $15/3 \text{ cm}$ واقع شده است. مرکز چشمه نوترونی در داخل پایل پلی‌اتیلنی به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شده و تمام اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌ها بر اساس این نقطه به عنوان نقطه مرجع انجام شده است. با اندازه‌گیری خواص کند کنندگی پلی‌اتیلنی، این پایل به عنوان یک پایل استاندارد، قابلیت استفاده جهت کالیبراسیون دزیمترها و آشکارسازهای نوترونی را دارد. با برداشتن میله‌های استوانه‌ای پلی‌اتیلنی از موقعیت‌های مختلف در این پایل، اندازه‌گیری‌های مختلفی با آشکارسازهای نوترونی و همچنین با فعال‌سازی پولک قابل انجام است. قبل از اندازه‌گیری پارامترهای لازم، ابتدا پایل پلی‌اتیلنی با کد مونت‌کارلوی MCNPX-2.7.0 شبیه‌سازی شد.



شکل ۳. بلوک‌های مکعبی بزرگ و کوچک به همراه میله‌های استوانه‌ای

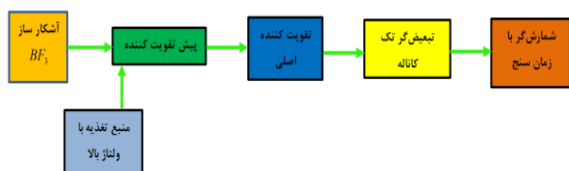
همچنین خواص نوترونی و مکانیکی بلوک‌های پلی‌اتیلنی استفاده شده در ساخت پایل پلی‌اتیلنی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. خواص پلی‌اتیلن استفاده شده در پایل

پارامتر	مقدار	واحد
سطح مقطع پراکندگی نوترون‌های سریع	۳۹	mbarn
بیشینه ناخالصی خاکستر	۲۴	ppm
بیشینه ناخالصی بورون	۰/۰۶	ppm
چگالی	۱/۰۸۵	gr/cm ³
شدت کشش	۵/۸۲	Kg/cm ²
سختی	۷/۲۶	Kg/cm ²

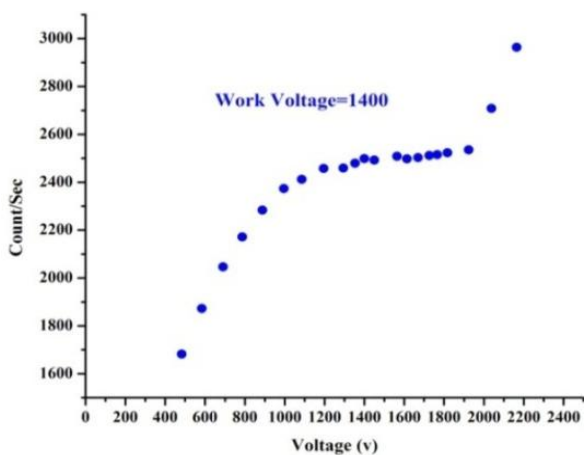
۴. نتایج و بحث

به منظور اطمینان از صحت مقدار ولتاژکاری آشکارساز BF_3 ، که از طرف کارخانه سازنده آن مشخص شده است، مطابق شکل (۷) به سامانه الکترونیکی متصل شد.



شکل ۷. روندنمای سامانه اندازه‌گیری برای آشکارساز BF_3

آهنگ شمارش ثبت شده توسط شمارنده را به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به آشکارساز را به دست آمد و با رسم منحنی آهنگ شمارش بر حسب ولتاژ، ولتاژکاری آشکارساز در ناحیه پلاتو انتخاب شد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، مقدار ولتاژ کاری برای آشکارساز استفاده شده، برابر ۱۴۰۰ ولت به دست آمد.



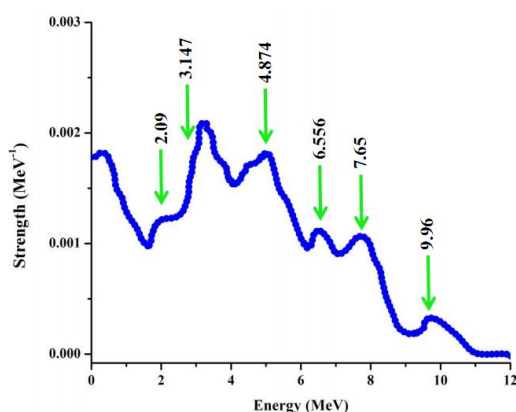
شکل ۸. تغییرات شمارش‌های حاصل از چشمه نوترونی بر حسب ولتاژ آشکارساز BF_3 در داخل پایل

آشکارساز BF_3 در داخل پایل قرار داده شده و خروجی آشکارساز به کمک نرم‌افزار DAS^1 به صورت طیف انرژی به دست می‌آید. DAS یک ابزار نرم‌افزاری برای آنالیز طیف استفاده گردید. طیف انرژی اندازه‌گیری شده، در شکل (۹) و چیدمان آزمایش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به طیف انرژی اندازه‌گیری شده، اثر دیواره آشکارساز و همچنین قله‌های تمام انرژی ۲/۳۱ MeV و ۲/۷۹ MeV کاملاً مشهود است.

در این کار از یک آشکارساز BF_3 برای اندازه‌گیری نوترون‌ها استفاده شده است. آشکارساز BF_3 مدل ASJ 106 B2.7 ساخت کشور چین بود. غلظت ایزوتوپی ^{10}B گاز BF_3 آشکارساز ۹۶ درصد و فشار گاز ۲۹/۹ سانتی‌متر جیوه است. طول و شعاع آشکارساز به ترتیب برابر با ۱۰ cm و ۱/۲۵ cm است.

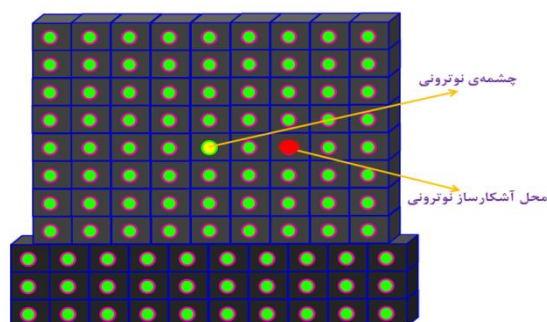
۳. شبیه‌سازی پایل با استفاده از کد MCNP

با استفاده از نرم‌افزار solidwork هندسه پایل، چشمه نوترونی و آشکارساز BF_3 طراحی شد و با استفاده از کد MCNPX-2.7.0 با تعداد نمونه‌برداری 10^7 ذره برنامه شبیه‌سازی اجرا گردید. برای تعریف چشمه نوترونی و طیف آن به ترتیب از دستورهای SDEF، SPn و SIN کد MCNP استفاده شد. طیف انرژی نوترون چشمه $^{241}Am-Be$ استفاده شده در شبیه‌سازی از مرجع [۱۰] استخراج شده است. شکل طیف انرژی در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵. طیف انرژی نوترون چشمه $^{241}Am-Be$ [۱۰]

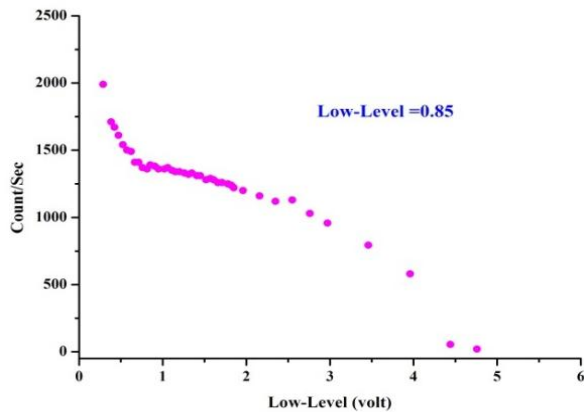
تالی F4 کد MCNP برای تعیین چگالی حجمی نوترون‌ها و تالی F8 کد MCNP برای شمارش پالس‌های تولید شده از نوترون‌ها در آشکارساز استفاده شده است. خروجی گرافیکی کد MCNP در شکل (۶) نشان داده شده است. پارامترهای لازم برای مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی، توسط کد MCNPX-2.7.0 محاسبه شدند.



شکل ۶. نمای از پایل با استفاده از خروجی کد MCNP راستای y-z

¹ Data Acquisition Software (Das)

مناسب، شمارش‌های آشکارساز را ثبت نموده و توزیع شار نوترون را به‌دست آورد.

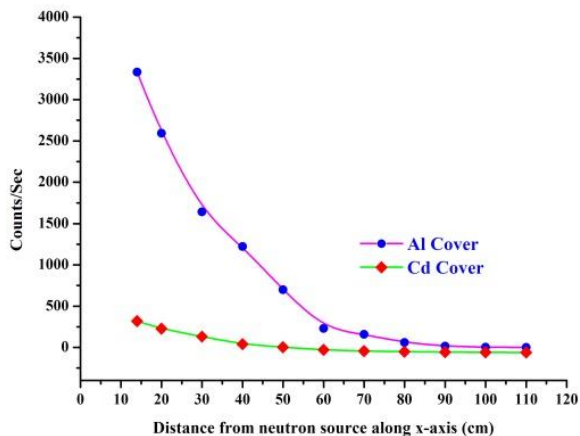


شکل ۱۱. منحنی تغییرات آهنگ شمارش‌های حاصل از آشکارساز BF_3 بر حسب تغییر سطح پایین تحلیل‌گر تک‌کاناله

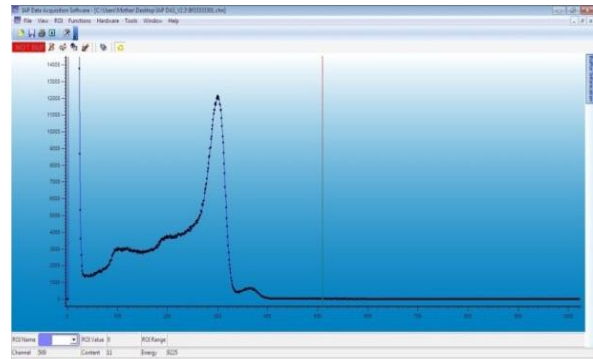
۱-۴. توزیع رفتار شار نوترونی در داخل پایل

توزیع شار نوترون‌های حرارتی و سریع در سه راستای محور x ، y و z اندازه‌گیری شد. با استفاده از آشکارساز BF_3 شار نوترون‌های حرارتی به‌دست آمد. همچنین با استفاده از یک پوشش کادمیومی با ضخامت یک میلی‌متر که دور تا دور آشکارساز BF_3 پیچیده شده بود شار نوترون‌های سریع نیز به‌دست آمد. همان‌طور که از شکل‌های (۱۲-۱۴) مشاهده می‌شود با دور شدن از چشمه نوترونی داخل پایل، شار نوترون‌های سریع و حرارتی سریعاً کاهش می‌یابد.

برای اینکه هندسه آشکارساز و میزان جذب گاما و سایر شرایط یکسان باشد از پوشش آلومینیومی به دلیل جذب ناچیز نوترون با همان ضخامت کادمیوم استفاده شد.



شکل ۱۲. تغییرات شار نوترونی حرارتی و سریع بر حسب فاصله از چشمه نوترونی در داخل پایل و در راستای محور x



شکل ۹. طیف انرژی اندازه‌گیری شده از آشکارساز BF_3



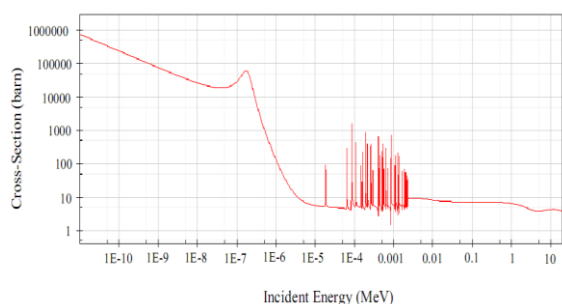
شکل ۱۰. چیدمان آزمایش و سامانه الکترونیکی استفاده شده

برای اندازه‌گیری نوترون، پالس‌های ناخواسته غیر نوترونی مانند گاما‌های چشمه و زمینه و همچنین نویز باید حذف شوند تا شمارش خالص نوترون به‌دست آید. با توجه به طیف انرژی اندازه‌گیری شده و به ویژه گستره ابتدایی طیف، سطح پایین تحلیل‌گر تک‌کاناله (SCA^1) طوری تنظیم گردید که پالس‌های گاما و نویز حذف شوند.

البته یک روش ابتدایی دیگر نیز برای تعیین مقدار مناسب سطح پایین SCA استفاده شد. در این روش منحنی تغییرات آهنگ شمارش‌های حاصل از آشکارساز را بر حسب تغییر سطح پایین SCA ترسیم گردید (شکل (۱۱)). سطح پایینی که به ازای آن میزان شمارش‌ها تقریباً ثابت است، از ورود پالس‌های گاما و نویز جلوگیری نموده و مقدار مناسب برای سطح پایین تحلیل‌گر تک‌کاناله است.

بعد از تنظیم مقدار ولتاژ کار، مقدار سطح پایین SCA و سایر موارد لازم، اگر پالس خروجی از SCA دارای شکل مناسبی باشد، شرایط لازم برای اندازه‌گیری توزیع شار نوترونی فراهم بوده و می‌توان با قرار دادن آشکارساز در نقاط مختلف و تنظیم زمان

¹ Single Channel Analyzer (Sca)



شکل ۱۵. سطح مقطع کل نوترونی عنصر کادمیوم [۱۱]

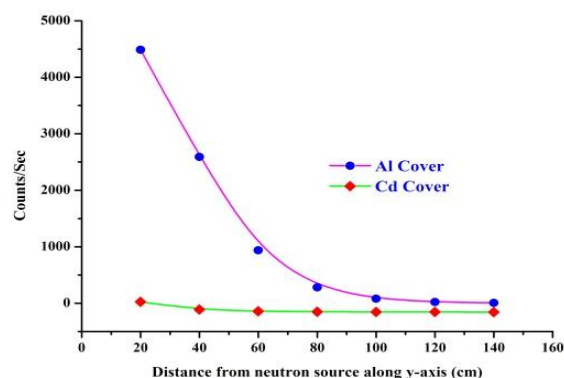
البته کادمیوم یک فیلتر کاملاً ایده‌آل نیست، یعنی احتمال عبور نوترون حرارتی از آن وجود دارد، هر چند که این احتمال بسیار کم و قابل نظر کردن است، ولی احتمال جذب نوترون با انرژی فوق حرارتی در آن قابل چشم‌پوشی نبوده و لازم است توسط عامل F_{Cd} تصحیح شود. عامل F_{Cd} به صورت نسبت فعالیت ناشی از نوترون‌های فوق حرارتی بدون پوشش کادمیوم به فعالیت ناشی از نوترون‌های فوق حرارتی با پوشش کادمیوم تعریف می‌شود. مقادیر E_{Cd} و F_{Cd} به عواملی مانند طیف انرژی نوترون، توزیع زاویه‌ای، سطح مقطع آشکارساز و کادمیوم بستگی دارند. البته مقدار F_{Cd} بر حسب نوع و ضخامت کادمیوم در مراجع هسته‌ای موجود است [۱۲].

یکی از کاربردهای مهم اندازه‌گیری پارامتر نسبت کادمیوم در محاسبه سطح مقطع انتگرالی عناصر است [۱۳ و ۱۴]. برای به‌دست آوردن انحنای شار نوترون (باکلینگ هندسی) در راستای شعاعی و محوری و شار مطلق نوترون، اندازه‌گیری توزیع فضایی نسبت کادمیوم جزء اساسی‌ترین نیازها است [۱۵]. با اندازه‌گیری نسبت کادمیوم در سه راستای x ، y و z در پایل، می‌توان ناحیه مجانبی را برای محاسبه باکلینگ تعیین نمود. نسبت کادمیوم با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

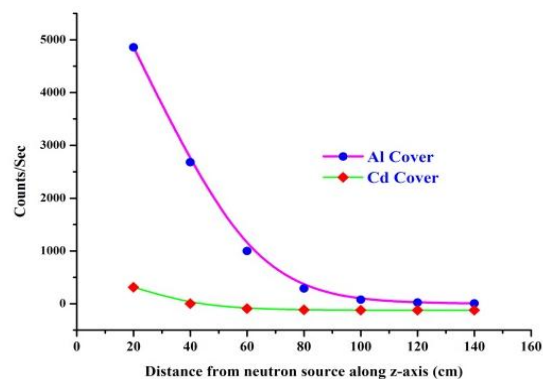
$$R_{Cd} = \frac{CR_{bare}}{CR_{Cd}} \quad (1)$$

در این رابطه، CR_{bare} آهنگ شمارش پالس‌ها در آشکارساز بدون پوشش کادمیومی، CR_{Cd} آهنگ شمارش پالس‌ها در آشکارساز با پوشش کادمیومی است. آشکارساز BF_3 یک بار با پوشش کادمیومی و بار دیگر بدون پوشش کادمیومی استفاده شده و نسبت کادمیوم در پایل اندازه‌گیری شده است. با استفاده از رابطه (۱)، مقدار نسبت کادمیوم بر حسب فاصله از چشمه نوترونی برای سه راستای x ، y و z اندازه‌گیری شده و همراه با نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۸-۱۶) نشان داده شده است.

خطاهای تجربی در اندازه‌گیری مقدار نسبت کادمیوم در یک سیستم هسته‌ای و همچنین در پایل عبارتند از: خطای آماری، هندسی و تعیین مقدار فاکتور پراکندگی. در پایل، هیچ میله



شکل ۱۳. تغییرات شار نوترونی حرارتی و سریع بر حسب فاصله از چشمه نوترونی در داخل پایل و در راستای محور y



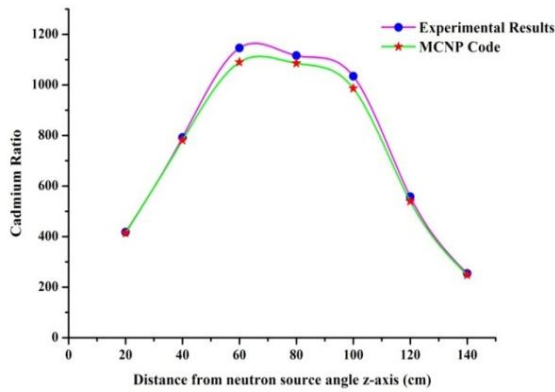
شکل ۱۴. تغییرات شار نوترونی حرارتی و سریع بر حسب فاصله از چشمه نوترونی در داخل پایل و در راستای محور z

۴-۲. نسبت کادمیوم

عنصر کادمیوم جاذب مناسب برای نوترون‌های حرارتی است، یعنی تقریباً تمام نوترون‌های حرارتی که به آن برخورد می‌کنند را جذب نموده و معمولاً بیشتر نوترون‌های فوق حرارتی^۱ را از خود عبور می‌دهد. انرژی قطع کادمیوم (E_{Cd})، مقدار انرژی است که اگر نوترونی با انرژی کمتر از آن به کادمیوم برخورد کند، کاملاً جذب کادمیوم می‌شود ولی نوترون‌هایی با انرژی بیشتر از این مقدار، از آن عبور می‌کنند. در شکل (۱۵) سطح مقطع کل نوترونی عنصر کادمیوم نشان داده شده است. در عمل، انرژی قطع کادمیوم بستگی به ضخامت پوشش کادمیوم، طیف نوترونی و نمونه مورد نظر دارد. به طور تقریبی می‌توان E_{Cd} را حدود ۰/۵ تا ۰/۶ الکترون ولت فرض کرد. اگر نمونه‌ای با پوشش کادمیوم به ضخامت نیم تا یک میلی‌متر تحت پرتوهای نوترون‌ها قرار بگیرد، نوترون‌های حرارتی جذب کادمیوم می‌شوند و تنها برهم‌کنش نوترون‌های فوق حرارتی صورت می‌گیرد و این اثر در واقع نشان دهنده اهمیت نسبت کادمیوم در بررسی مسائل فیزیک نوترون است [۱۱].

^۱ Epi-Thermal

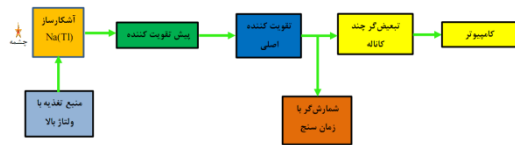
^۲ Cadmium Cut-Off Energy



شکل ۱۸. نسبت کادمیوم بر حسب فاصله از چشمه نوترونی در داخل پایل و در راستای محور Z

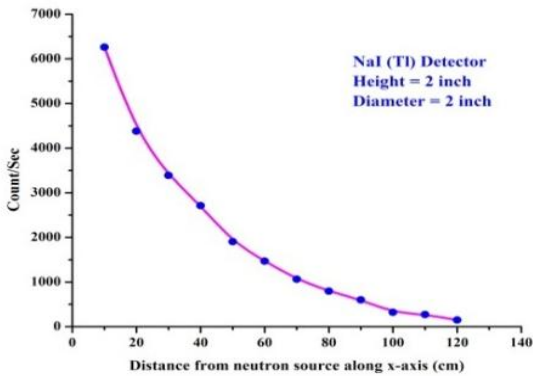
۳-۴. توزیع رفتار پرتوهای گاما در داخل پایل

همچنین با استفاده از آشکارساز یدور سدیم با ابعاد "۲ × ۲"، که مطابق شکل (۱۹) به سامانه الکترونیکی وصل شده، توزیع فوتون‌های حاصل از چشمه نوترونی و القاء شده در سه راستای محور x، y و z اندازه‌گیری شد. چشمه ²⁴¹Am-Be گاماهایی با انرژی ۴/۴۳۸ MeV تولید می‌کند که از اولین حالت برانگیخته اتم ¹²C ناشی می‌شود. در اندازه‌گیری پرتوهای گاما، سطح زیر قله فوتوپیک با انرژی ۴/۴۳۸ MeV در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۹. روندنمای سامانه اندازه‌گیری برای آشکارساز یدور سدیم

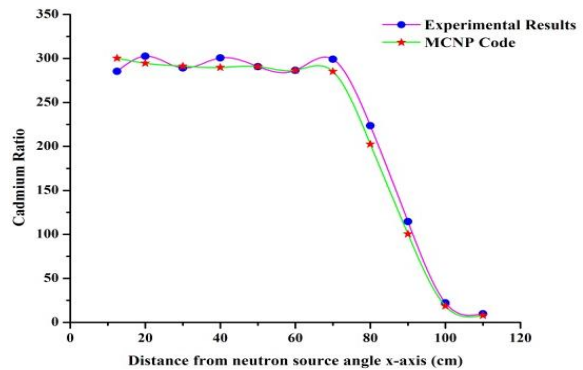
در شکل‌های (۲۰-۲۲) توزیع مکانی پرتوهای گاما نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها نیز مشاهده می‌شود با زیاد شدن فاصله از چشمه، شدت پرتوهای گاما کاهش می‌یابد.



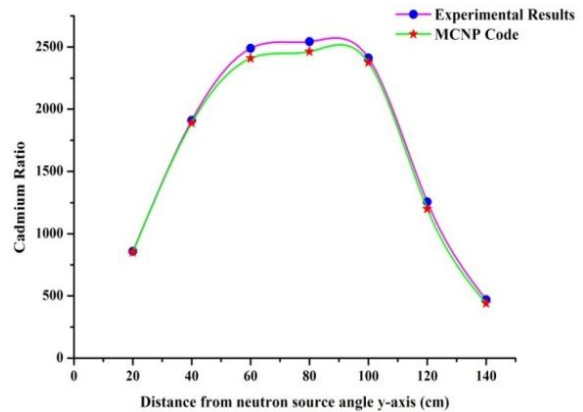
شکل ۲۰. توزیع پرتوهای گامای حاصل از چشمه نوترونی در داخل پایل بر حسب فاصله از چشمه در راستای محور X

سوختی وجود ندارد بنابراین از خطای ناشی از فاکتور پراکندگی صرف نظر نموده‌ایم [۱۵]. خطای آماری در شمارش نوترون‌ها با استفاده از آشکارساز BF₃ با پوشش آلومینیومی به طور میانگین در حدود ۵/۲ درصد و با پوشش کادمیومی به طور میانگین در حدود ۷/۱ درصد است. تفاوت خطای این دو حالت اندازه‌گیری، ناشی از آمار شمارش‌ها است. خطای هندسی برای پوشش کادمیومی به ضخامت یک میلی‌متر در حدود یک درصد است.

همان‌طور که از شکل (۱۶) مشاهده می‌شود در راستای محور xها در فاصله‌ی تقریباً ۱۵ تا ۸۰ سانتی‌متری از چشمه نوترون مقدار نسبت کادمیوم ثابت است و در این فاصله، طیف پایدار بوده و اصطلاحاً به ناحیه فیزیکی یا ناحیه مجانبی^۱ معروف است. طبق تعریف، ناحیه‌ای که توزیع شار نوترون در آن، از نظریه پخش تک گروهی تبعیت می‌کند و بازتابنده در آن ناحیه، تأثیری ندارد و طیف نوترون پایدار است، ناحیه مجانبی نامیده می‌شود. ولی در راستای محور y و z با توجه به شکل‌های (۱۷ و ۱۸) اندازه ناحیه مجانبی کمتر است.



شکل ۱۶. نسبت کادمیوم بر حسب فاصله از چشمه نوترونی در داخل پایل و در راستای محور X

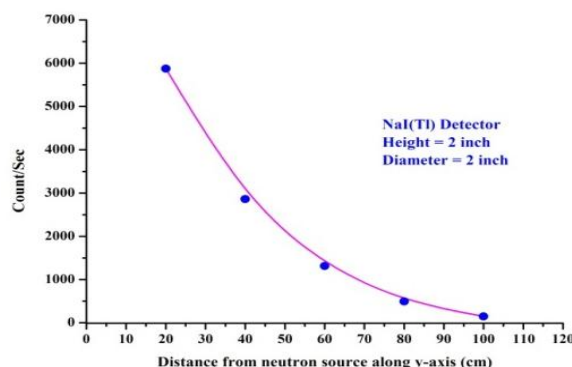


شکل ۱۷. نسبت کادمیوم بر حسب فاصله از چشمه نوترونی در داخل پایل و در راستای محور Y

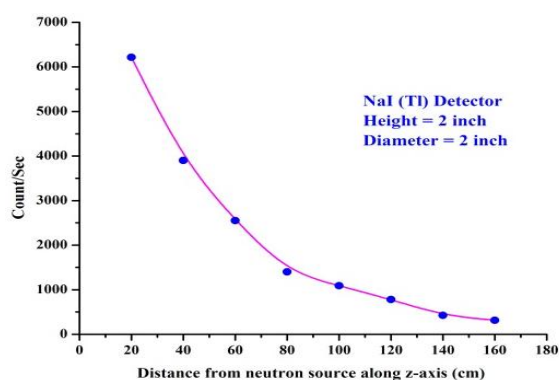
¹ Asymptotic Region

۶. مراجع

- [1] Shani, G. "Radiation Dosimetry Instrumentation and Methods"; 2nd Ed., CRC Press, 2000.
- [2] Cember, H.; Johnson, T. E. "Introduction to Health Physics"; 4th Ed., McGraw-Hill Companies, Inc, 2009.
- [3] Michikaw, T.; Sanami, T.; Hagiwara, M.; Kadotani, H. "Absolute Calibration of Radioactive Neutron Source Strength by Geometrical Integration of Thermal Neutrons in Graphite Pile"; J. Appl. Phys. 2008, 47, 3635-3637.
- [4] Sannami, T. "KEK Graphite- Pile"; <http://rcwww.kek.jp/research/pile.html>, 2000.
- [5] Astuto, A.; Salgado, A. P.; Leite, S. P.; Lopes, R. T. "Thermal Neutron Calibration Channel at LNMRI/IRD"; Radiat. Prot. Dosim. 2014, 161, 185-189.
- [6] Kim, S. I.; Chang, I.; Kim, B. H.; Kim, J. L.; Lee, J. I. "Spectrum Weighted Responses of Several Detectors in Mixed Fields of Fast and Thermal Neutrons"; Nucl. Eng. Tech. 2014, 46, 273-280.
- [7] Bohus, L. S.; Barros, H.; Greaves, E. D.; Carrillo, H. R. "Graphite Moderated 252Cf Source"; Appl. Radiat. Isotopes 2015, 100, 108-112.
- [8] Vykydal, Z.; Králík, Z.; Jančář, A.; Kopecký, Z.; Dressler, J.; Veškrna, M. "Characterization of the Graphite Pile as a Source of Thermal Neutrons"; Radiat. Phys. Chem. 2015, 116, 65-68.
- [9] Tsujimura, N.; Yoshida, T. "Design of a Graphite Moderated 241Am-Li Neutron Field to Simulate Reactor Spectra"; Radiat. Meas. 2010, 45, 1359-1362.
- [10] ISO 8529-1 "Reference Neutron Radiations. Part 1: Characteristics and Methods of Production"; Int. Organization for Standardization, 2001.
- [11] Lamarsh, J. R. "Introduction to Nuclear Reactor Theory"; Addison-Wesley Publishing Company, 1966.
- [12] Valente, A. F. "A Manual Experiments in Reactor Physics"; The Macmillan Company, New York, 1963.
- [13] Karadag, M.; Yücel H.; Budak, M. H. "Measurement of Thermal Neutron Cross Section and Resonance Integral for (n, γ) Reaction in 152Sm"; Ann. Nucl. Energy 2007, 34, 188-193.
- [14] Karadag, M.; Budak, M. G.; Yücel H. "Measurement of Thermal Neutron Cross Section and Resonance Integral for the 158Gd(n, γ)159Gd Reaction by Using a 55Mn Monitor"; Ann. Nucl. Energy 2014, 63, 199-204.
- [15] Kadotani, H. "Measurements of Spatial Distribution of Cadmium Ratio in Heterogeneous Lattices"; J. Nucl. Sci. Tech. 1966, 3, 27-31.



شکل ۲۱. توزیع پرتوهای گامای حاصل از چشمه نوترونی در داخل پایل بر حسب فاصله از چشمه در راستای محور y



شکل ۲۲. توزیع پرتوهای گامای حاصل از چشمه نوترونی در داخل پایل بر حسب فاصله از چشمه در راستای محور Z

۵. نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری شار و دزیمتری محیط تابش نوترونی یکی از پارامترهای بسیار مهم در مراکز کالیبراسیون آشکارسازها و دزیمترهای نوترونی است. در این مقاله بعد از طراحی و ساخت پایل پلی‌اتیلن، شار نوترون‌های حرارتی و سریع با استفاده از آشکارساز BF_3 اندازه‌گیری شد. نسبت کادمیوم در سه راستای x ، y و z اندازه‌گیری گردید و مشخص شد که در راستای محور x در فاصله ۱۵ تا ۸۰ سانتی‌متری، این پارامتر تقریباً ثابت است، ولی در راستای محور y و z این فاصله کوچک‌تر است و نشان می‌دهد برای اندازه‌گیری‌هایی که نیاز به ناحیه‌ای با طیف تقریباً ثابت داریم راستای محور x بهتر از دو راستای دیگر است. با ساخت این پایل در واقع یک آزمایشگاه دزیمتری و اندازه‌گیری برای کالیبراسیون دزیمترها و آشکارسازهای نوترونی با محیط حاوی مواد آلی سبک در کشورمان ایجاد شده و نیاز کشور را برطرف می‌نماید.