

استخراج طیف چشمه‌های نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf با استفاده از

سامانه طیف‌نگار کره‌های بانر

محمدعلی ورشابی^۱، سعید حمیدی^۱، محمدرضا کاردان^۲ و علی اکبر کاظمی موحد^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک

۲. گروه پژوهشی ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتو، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

پست الکترونیکی: m-varshabi@arshad.araku.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۸/۲۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۹/۱۷)

چکیده

یکی از روش‌های اندازه‌گیری توزیع انرژی نوترون استفاده از سامانه کره‌های بانر است که در زمینه طیف‌نگاری و دزیمتری نوترون مورد استفاده است. این سامانه شامل یک آشکارساز نوترون حرارتی است که در مرکز کره پلی‌اتیلنی قرار می‌گیرد و به دلیل همسان‌گرد بودن پاسخ دستگاه ناشی از تقارن کروی کندکننده‌ها و نیز پهنای وسیع محدوده انرژی قابل اندازه‌گیری، هنوز قابل استفاده و مفید است. به منظور استفاده کاربردی از این طیف‌سنج، لازم است این دستگاه توسط چشمه‌های نوترونی استاندارد، کالیبره شود. هدف این پژوهش، تعیین ضریب کالیبره کردن سامانه طیف‌نگاری کره‌های بانر مجهز به آشکارساز سوسوزن یدید لیتیوم، متعلق به آزمایشگاه کالیبره کردن سازمان انرژی اتمی، و به دست آوردن طیف انرژی دو چشمه استاندارد $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf موجود در سازمان مزبور می‌باشد. کالیبره کردن و اندازه‌گیری داده‌های تجربی توسط دو چشمه استاندارد مذکور انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی و بردار پاسخ مربوط به هر آشکارساز، از طریق کد شبیه‌سازی MCNPX براساس روش مونت‌کارلو به دست آمده است. بازیابی طیف‌ها مربوط به این سامانه، به روش تکرار و از طریق کد SPUNIT توسط نرم‌افزارهای NSDUAZ^۶Li(Eu)Ver^{۱/۰} و نرم‌افزار برخط BUMS، صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی، کالیبره کردن، طیف‌نگار بانر، بازیابی طیف، چشمه‌های نوترونی

۱. مقدمه

آشکار می‌سازیم. ذره باردار یا فوتون، فرآورده برهم‌کنش نوترون با هسته است [۱]. واکنش‌های بسیاری از نوع (ذره باردار، n) وجود دارند که برای آشکارسازی نوترون به کار می‌روند. یکی از واکنش‌های گرمایی که برای نوترون‌های

چون نوترون ذره‌ای خنثی و بدون بار است، اتم را مستقیماً یونیده نمی‌کند، از این رو آن را به طور «غیر مستقیم» با آشکارسازی مناسب ذره باردار یا فوتونی که تولید می‌کند،

تعیین توزیع طیف نوترون در کنار شتاب‌دهنده‌های ذرات، رآکتورهای قدرت و دیگر ابزارآلات هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. یکی از معایب این روش تفکیک انرژی پایین آن است و به این دلیل است که نوسانات آماری در شمارش برخوردهای نوترون، هنگام کاهش انرژی، زیاد است و همچنین تشخیص برهم‌کنش نوترون داخل کره‌ها از یکدیگر، غیر ممکن است. در نتیجه کمبود اطلاعات ما از انرژی نوترون اولیه موجب کاهش قدرت تفکیک انرژی دستگاه می‌شود [۵]. نوترون‌های حاصل از واکنش‌های هسته‌ای معمولاً دارای انرژی بیش از انرژی حرارتی هستند. این نوترون‌ها، هنگام برخورد با اتم‌های محیط، که ممکن است برخورد کشسان یا برخورد ناکشسان باشد، پخش شده و کسری از انرژی خود را از دست می‌دهند. کارایی مواد برای تضعیف نوترون متناسب با عکس عدد جرمی آنهاست، بنابراین بهترین کندکننده‌ها از سبک‌ترین عناصر تشکیل شده‌اند. یک کندکننده خوب باید دارای سطح مقطع جذب نوترون پایینی باشد. پلی‌اتیلن از جمله مواد کندکننده خوب برای نوترون‌های نه‌چندان تند می‌باشند [۶]. سامانه طیف‌نگاری نوترون بانر علاوه بر یک آشکارساز (بدون کندکننده)، شامل پنج کره پلی‌اتیلنی به قطرهای ۲، ۳، ۵، ۸، ۱۰، و ۱۲ اینچ می‌باشد. معمولاً یک دسته ۵ یا ۶ تایی از کره‌های پلی‌اتیلنی با قطرهای بین ۲ تا ۱۲ اینچ برای تعیین طیف نوترون از حرارتی تا ۲۰ MeV کافی است. برای کاربرد دستگاه در محدوده انرژی بالاتر از ۱۰۰ MeV تا حدود GeV، به کره‌ها، لایه‌های فلزی با اعداد اتمی بالا (مانند: سرب، مس، آهن و غیره) افزوده می‌شود که در انرژی‌های بالای ۲۰ MeV این فلزات به عنوان تعویض‌کننده انرژی، با برهم‌کنش (n, xn) عمل می‌کنند. تولید نوترون‌های ثانویه در برهم‌کنش (n, xn) می‌تواند حساسیت سامانه را برای آشکارسازی نوترون در انرژی‌های بالا افزایش دهد [۷]. در دستگاه بانر، انرژی نوترون بر اساس اختلاف بازده برای کره‌های پلی‌اتیلنی با ابعاد مختلف تعیین می‌شود. برای نوترون‌های با انرژی معین، اندازه کره بر میزان کندشدن نوترون اثر می‌گذارد، که این خود بازده آشکارسازی سوسوزن لیتیومی را تحت اثر قرار می‌دهد [۲]. پس از کند

حرارتی به کار می‌رود برهم‌کنش نوترون با ${}^6\text{Li}$ است [۲]. در سال ۱۹۵۵ و در تلاشی برای توسعه طیف‌سنج‌های نوترونی، برملت^۱، اوینگ^۲ و بانر^۳ پس از تحقیق و بررسی فراوان طیف‌سنج نوترونی جدیدی را بر پایه یک سوسوزن از جنس یدید لیتیوم که در مرکز تعدادی کره از جنس پلی‌اتیلن با قطرهای متفاوت قرار می‌گرفت، طراحی کردند، که طیف‌نگار کروی بانر نام گرفت [۳]. در این مقاله سعی بر این است که پس از کالیبره کردن سامانه طیف‌نگاری بانر با استفاده از چشمه‌های متعارف امرسیوم-بریلیوم (${}^{241}\text{Am-Be}$) و کالیفورنیوم (${}^{252}\text{Cf}$)، طیف انرژی این دو چشمه را توسط سامانه مذکور به دست آوریم. برای این کار ابتدا توسط آشکارساز سوسوزنی از جنس بلور یدید لیتیوم (${}^7\text{Li(Eu)}$) به همراه پنج کره بانر با اندازه‌های مختلف، به صورت تجربی آهنگ شمارش نوترون این چشمه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سپس توسط کد MCNPX طیف چشمه‌های نوترونی برای شرایط مذکور شبیه‌سازی شده و پاسخ آشکارساز نسبت به این چشمه‌ها به دست می‌آیند. آنگاه با استفاده از نتایج به دست آمده و روابط مربوط به کالیبره کردن سامانه، ضریب کالیبره کردن سامانه به دست می‌آید. در نهایت با اصلاح نتایج تجربی با اعمال ضریب‌های کالیبره کردن و بازبایی آنها، طیف‌های انرژی دو چشمه ${}^{241}\text{Am-Be}$ و ${}^{252}\text{Cf}$ به دست می‌آیند.

۲. سامانه طیف‌نگاری کره‌های بانر

دستگاه طیف‌سنجی کره‌های بانر به طور وسیع بیش از ۴۰ سال است که در زمینه دزی‌متری و طیف‌سنجی به کار می‌رود. همسان‌گرد بودن پاسخ این دستگاه ناشی از تقارن کروی کندکننده‌ها، پهنای وسیع محدوده انرژی (از نوترون حرارتی تا نوترون‌هایی با انرژی GeV) و آسان بودن کار با این دستگاه موجب شده هنوز مورد استفاده و مفید باشد. دستگاه طیف‌سنجی کروی بانر در زمینه حفاظت در برابر اشعه جهت

۱. Bramblett

۲. Ewing

۳. Bonner

بازیابی) به دست می‌آید:

$$C_i = \int dE R_i(E) \frac{d\{}}{dE} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

که C_i نمایش آهنگ شمارش i امین کره برحسب شمارش در ثانیه می‌باشد. $R_i(E)$ تابع پاسخ انرژی برحسب cm^2 مربوط به آشکارساز نوترون حرارتی می‌باشد که در مرکز i امین کره قرار

گرفته است و $\frac{d\{}}{dE}$ توزیع انرژی شار نوترون برحسب $\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}^{-1}$ می‌باشد. تخمین تقریباً خوبی را برای $R_i(E)$

می‌توان با محاسبات مونت کارلو به دست آورد. اعتبارسنجی آنها را با اندازه‌گیری چشمه‌های نوترونی که دارای پرتوهای نوترونی تک‌انرژی هستند می‌توان به دست آورد. چنانچه $R_i(E)$ به صورت توابع گسسته محاسبه شود، مسئله به صورت گسسته

حل می‌شود. $\frac{d\{}}{dE}$ می‌تواند به صورت $\frac{d\{}}{dE}$ نوشته شود، که

شار نوترونی کل برحسب cm^2 و $\frac{d\{}}{dE}$ توزیع انرژی بهنجار

شده به واحد است. در مقایسه، z می‌تواند به صورت z

نوشته شود، که z شکل گسسته $\frac{d\{}}{dE}$ است. بنابراین معادله

گسسته به صورت زیر در می‌آید:

$$C_i = f \cdot W \sum_{j=1}^{N_s} R_{ij} \cdot \{z\} \cdot \Delta E_j \quad (2)$$

که R_{ij} تابع پاسخ (توسط کدهای مونت کارلو یا از طریق منابع قابل دسترس به دست می‌آید) مربوط به i امین کره در میانگین بازه انرژی E_j می‌باشد. تمام ناحیه انرژی به N_s بخش تقسیم می‌شود. z شار نوترون (برحسب cm^2) در بازه انرژی E_j و f ضریب کالیبره کردن طیف‌سنج می‌باشد. روش‌های بازیابی، با معکوس کردن معادله بالا، طیف نوترون را از قرائت کره‌ها، به دست می‌آورند [۴].

سامانه طیف‌نگاری کره‌های بانر^۵ مورد استفاده در این کار، LUDLUM مدل ۵-۴۲ ساخت کشور ایالات متحده آمریکا متعلق به سازمان انرژی اتمی است، که شامل ۶ کره پلی‌اتیلنی با چگالی 0.95 gr/cm^3 به شعاع‌های ۲، ۳، ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ اینچ بوده و به یک آشکارساز سوسوزن $^6\text{Li(Eu)}$ استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۴ میلی‌متر و قطر ۴ میلی‌متر مجهز است (شکل ۱) [۸].



شکل ۱. تصویر چیدمان سامانه طیف‌نگاری کره‌های بانر مجهز به آشکارساز $^6\text{Li(Eu)}$ و مخروط سایه در آزمایشگاه کالیبره کردن.

شدن، نوترون‌ها با قطعه سوسوزنی که در مرکز کره‌ها قرار دارد برخورد کرده و پس از برهم‌کنش ^3H ($^6\text{Li}(n, \text{H})$) ذرات آلفا با انرژی ۲٫۰۴ مگا الکترون ولت و تریتیوم با انرژی ۲٫۷۳ مگا الکترون ولت خارج می‌شوند، که وظیفه پخش انرژی در بلور سوسوزن را بر عهده می‌گیرند و برهم‌کنشی از نوع برهم‌کنش ذرات باردار سنگین با بلور انجام می‌دهند. یعنی با برخوردها و پراکندگی‌های متوالی در بلور انرژی خود را از دست می‌دهند. این انرژی به الکترون‌های اتمی بلور منتقل شده و آنها را یونیزه می‌کند و به این صورت دسته‌ای از کوانتوم‌های نور تولید می‌شوند که پس از عبور از سوسوزن، با فرض عدم جذب، با طول موجی در حدود ۳۸۶ نانومتر وارد نوربر می‌شود و پس از عبور، در فوتوکاتد به ازای فوتون‌های ورودی، الکترون تولید و در تکثیرکننده‌ها تکثیر می‌شود. سرانجام به صورت پالس‌های الکترونیکی درآمده و در شمارنده شمارش می‌شوند. هر پالس نشان دهنده یک برهم‌کنش $^6\text{Li}(n, \text{H})$ انجام شده می‌باشد و ارتفاع پالس‌ها به انرژی نوترون واکنش دهنده بستگی دارد [۳].

وقتی کره به صورت یکنواخت توسط چشمه نوترون پرتودهی شده باشد، تابع پاسخ آشکارساز حرارتی در کره معین، به صورت شمارش آشکارساز به ازای شار واحد، تعیین می‌شود. فرآیند فرار و جذب نوترون، نتیجه تابع پاسخ را در انرژی‌های بالا و پایین محدود می‌کند با توجه به این که هر کره تابع پاسخ انرژی یکتایی دارد، طیف نوترون از طریق بررسی اندازه‌گیری m کره به وسیله وارون کردن معادله انتگرالی فردهلم^۴ (فرآیند

۵. Bonner Sphere Spectrometer (BSS)

۴. Fredholm

کره است و $e^{-\Sigma_i}$ ضریب تضعیف هوا برحسب cm^{-1} است که برای طیف چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ ، مقدار آن برابر است با $\text{cm}^{-1} \times 10^{-7} \times 89.0$ و برای چشمه ^{252}Cf ، برابر است با $\text{cm}^{-1} \times 10^{-7} \times 1.055$. بعد $\{_{ref}$ به صورت $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ بیان می‌شود. در این رابطه چون تغییر کمیت $e^{-\Sigma_i}$ با قطر کره‌ها ناچیز است، $\{_{det}$ برای تمام کره‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. کمیت دوم که تأثیر شار نوترون مستقیم بر آشکارساز است را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\{_{det} = \frac{C_i}{R_i}, \quad (4)$$

که در آن C_i آهنگ شمارش آشکارساز برحسب s^{-1} و R_i پاسخ آشکارساز برحسب cm^2 است که به نوعی می‌توان آن را بازده وسیله اندازه‌گیری دانست.

حال با دانستن دو کمیت مذکور می‌توان ضریب کالیبره کردن هر حالت آشکارساز (آشکارساز بدون کره بانر و ۶ حالت آشکارساز همراه با کره‌های بانر مختلف) را برای کالیبره کردن سامانه طیف‌نگاری بانر به دست آورد، که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد

$$f_i = \frac{\{_{det}^i}{W_{ref}} = \frac{C_i}{W_{ref} R_i}. \quad (5)$$

این رابطه در واقع متناظر با رابطه (۲) است که از انتگرال فردهم نتیجه می‌شود

$$f_i = \frac{C_i}{W_{ref} \sum_{j=1}^{N_s} R_{ij}^* W_j \Delta E_j}, \quad (6)$$

که در آن W_j ، طیف گسسته چشمه استاندارد در بازه معلوم E_j است. R_{ij} ، بیان‌گر توابع پاسخ دستگاه می‌باشد. C_i شمارش مستقیم برای هر کره و W_{ref} نیز مقدار محاسبه شده از رابطه (۴) می‌باشد. در مخرج رابطه ۶،

$$R_i = \sum_{j=1}^{N_s} R_{ij}^* W_j^{Am-Be} \cdot \Delta E_j \quad (7)$$

بردار پاسخ و برحسب cm^2 بیان می‌شود که از شبیه‌سازی دستگاه و از طریق کدهای شبیه‌سازی مانند MCNPX به دست می‌آیند [۴].

۳.۱. روش‌های تصحیح پراکندگی

روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری تصحیحات پراکندگی برای

۳. کالیبره کردن سامانه طیف‌نگاری کره‌های بانر

پاسخ یا ضریب کالیبره کردن یک دستگاه، مشخصه منحصر به فرد آن دستگاه است و ممکن است به دز معادل نسبی، طیف چشمه نوترون و زاویه فرودی نوترون‌ها وابسته باشد اما تابعی ویژگی ابزار کالیبره کردن یا روش‌های به کار رفته در اندازه‌گیری‌های تجربی نمی‌باشد. قرائت‌های دستگاه باید برای تمام اثراتی که موجب آشکارسازی نوترون‌های پراکنده می‌شوند، تصحیح شوند. این اثرات می‌تواند پراکندگی از هوا، دیواره‌ها، سقف یا زمین اتاق کالیبره کردن باشد. ممکن است نیاز باشد قرائت‌ها نسبت به اندازه چشمه یا آشکارساز نیز تصحیح شود [۹].

در این تحقیق، این سامانه را در دو میدان نوترونی، چشمه استاندارد $^{241}\text{Am-Be}$ و چشمه استاندارد ^{252}Cf کالیبره می‌کنیم و ضرایب کالیبره کردن را برای تمام حالات آشکارساز بدون کندکننده و همراه با شش کره بانر به دست می‌آوریم. روند کالیبره کردن اصولاً به دانستن دو کمیت نیاز دارد:

- ۱- شار نوترون مرجع (قبل از هر پراکندگی و برخورد) در یک نقطه معین (شار نوترون میدان استاندارد - $\{_{ref}$).
- ۲- تأثیر شار نوترون مرجع که بدون پراکندگی و به طور مستقیم به آشکارساز می‌رسد ($\{_{det}$).

کمیت نخست برای یک میدان مرجع (میدان نوترونی استاندارد)، مشخص است. اما تعیین کمیت دوم با کاربرد روش‌های ویژه‌ای برای اندازه‌گیری میزان پرتوهای پراکنده و همچنین محاسبه پاسخ آشکارساز با شبیه‌سازی به روش مونت‌کارلو امکان‌پذیر است.

شاری که به طور مستقیم به نقطه اندازه‌گیری می‌رسد، W_{ref} ، کمیتی است که براساس رابطه زیر قابل محاسبه است. در این رابطه ضریب تصحیح ناهمسانگردی چشمه ($F_1(r)$) به صورت $e^{-\Sigma_i}$ بیان می‌شود [۴]

$$W_{ref} = \frac{B}{4fl_0} e^{-\Sigma_i}, \quad (3)$$

که در آن B ، قدرت چشمه بر حسب s^{-1} ، l_0 فاصله چشمه تا آشکارساز برحسب cm ، $l = l_0 - r$ که در آن r شعاع هر

که در این رابطه، s مقدار پراکندگی در واحد فاصله کالیبره کردن و توسط معادله زیر داده می‌شود

$$\left\{ = \frac{B_{\Omega}}{l^2}, \quad (10)$$

$$B_{\Omega} = \frac{B \times F_1(n)}{4f}. \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) عبارت $F_1(n)$ ضریب تصحیح ناهمسان‌گردی چشمه می‌باشد، که بیشتر به آن اشاره کردیم.

تصحیح اثرات هوا (شامل پراکندگی و میرایی در هوا) توسط عبارت $(1+Al)$ داده می‌شود. مقدار محاسبه شده A برای چند دستگاه در مقابل ۴ چشمه پیشنهاد شده در مرجع [۱۰] جهت کالیبره کردن نشان داده شده است. رسم سمت چپ معادله (۹) بر حسب l^2 ، یک خط راست را نمایش می‌دهد. با رسم این خط بین داده‌های تجربی، محل تقاطع با محور عمودی شار نسبی R و شیب خط، سهم پراکندگی اتاق را که با s نمایش داده می‌شود، نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌ها در روش مخروط سایه در فاصله ۱۱۵ cm و در روش نیمه تجربی در چند فاصله مختلف بین ۵۰ cm و ۲۰۰ cm از چشمه انجام شده است [۹].

۴. بازیابی طیف

پس از انجام هر طیف‌سنجی تعدادی شمارش اندازه‌گیری شده برحسب انرژی وجود دارند که به عنوان داده‌های خام محسوب می‌شوند و به ندرت پاسخ مسأله‌ای را که هدف اندازه‌گیری است در بر می‌گیرند. در اغلب موارد، محاسبه‌های بیشتر یا تحلیل این داده‌ها ضروری است. یکی از این روش‌ها، روش بازیابی^۶ است که توسط آن می‌توان شار انرژی چشمه را که با معادله انتگرالی فردهلم به تابع پاسخ مسأله و شمارش‌های ثبت شده، مربوط می‌شود، استخراج کرد. روش‌های بازیابی، با معکوس کردن معادله (۲)، طیف انرژی نوترون را از قرائت کره‌ها، حاصل می‌کند. در فرآیند بازیابی، ماتریس پاسخ طیف‌سنج برای یک طیف آزمایشی به کار رفته و یکسری از شمارش‌ها برای کره‌های

کالیبره کردن مناسب دستگاه طیف‌سنج نوترون وجود دارد، در اینجا به معرفی دو روش که در این تحقیق به کار برده شده‌اند، می‌پردازیم.

۳.۱.۱. روش مخروط سایه

این روش بر اساس اندازه‌گیری پراکندگی از هوا و دیواره‌ها توسط دستگاه به صورت تجربی است. در این روش نوترون‌هایی که در راستای مستقیم از چشمه به آشکارساز می‌رسند، از طریق مخروط سایه حذف می‌شوند. اگر $Ms(l)$ و $MT(l)$ به ترتیب قرائت به دست آمده در حضور و عدم حضور مخروط سایه بین چشمه و آشکارساز باشد، رابطه زیر برقرار خواهد بود

$$[M_T(l) - M_s(l)]F_A(l) = M_c(l), \quad (8)$$

که در آن $F_A(l)$ ضریب میرایی هوا برای چشمه‌های رادیونوکلئیدی نوترون پیشنهاد شده در مرجع [۱۰] و $M_c(l)$ قرائت خالص آهنگ شمارش نوترون توسط آشکارساز می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها عموماً در فاصله بیش از دو برابر طول مخروط سایه انجام می‌شود بنابراین $F_A(l)$ برای چشمه و آشکارساز با اندازه محدود، تقریباً واحد در نظر گرفته می‌شود.

۳.۱.۲. روش نیمه تجربی

در این روش که نیمه تجربی نامیده می‌شود، فرض بر این است که بخشی از قرائت دستگاه که ناشی از نوترون‌های پراکنده است را می‌توان از طریق محاسبه انحراف قرائت‌ها از قانون وارون مربعی به دست آورد. بعضی از مؤلفه‌ها مستقل از l هستند، مانند بازگشت نوترون‌ها از طریق اتاق و بعضی به صورت خطی با فاصله جدایی بین چشمه و آشکارساز تغییر می‌کنند مانند پراکندگی از هوا.

تابش کل نوترون‌ها که با $MT(l)$ نشان داده می‌شود و برابر با مقدار نوترون‌های چشمه به علاوه نوترون‌های پراکنده شده می‌باشد، به پاسخ خالص شار که با R نمایش داده می‌شود و نیز فاصله جدایی چشمه و آشکارساز به صورتی که در رابطه (۲) نشان داده شده است وابسته می‌باشد [۹]

$$\frac{M_T(i)}{\{ \times F_1(i) \times (1+Al) \}} = R \{ (1+sl^2) \}, \quad (9)$$

۵. نتایج و بررسی‌ها

۵.۱. اندازه‌گیری‌های تجربی

برای انجام مراحل تجربی این تحقیق، از آزمایشگاه کالیبره کردن امور حفاظت در برابر اشعه سازمان انرژی اتمی (پرديس شهيد شهرياري) استفاده شد. در این آزمایشگاه چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ با فعالیت ۹/۶۷ کوری (در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۲) در غلافی استوانه‌ای از جنس فولاد به طول ۶۰ و قطر ۳۰ میلی‌متر قرار دارد. همچنین چشمه نوترونی ^{252}Cf با فعالیت ۷/۳ میلی‌کوری (در تاریخ ۱۳۹۱/۵/۲) در غلافی استوانه‌ای به طول ۱۰ میلی‌متر و قطر ۷/۸ میلی‌متر از جنس فولاد می‌باشد. اندازه‌گیری آهنگ شمارش نوترون توسط آشکارساز بدون کره و سپس به ترتیب همراه با ۶ کره بانر با قطرهای ۲، ۳، ۵، ۸ و ۱۰ اینچی می‌باشد، که هر حالت ۴ بار و هر بار به مدت ۱ دقیقه، در معرض پرتو دهی چشمه‌های استاندارد $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf قرار می‌گیرد. همچنین قبل از پرتو دهی، تابش زمینه به مدت یک دقیقه اندازه‌گیری می‌گردد. با میانگین‌گیری و کم کردن پرتوی زمینه، داده‌های کل شامل مجموع پرتوهای خالص و پراکنده به دست آمده و انحراف معیار نیز محاسبه شده است. جهت کالیبره کردن با توجه به این که روش مخروط سایه جواب بسیار خوبی برای کره‌های بزرگ‌تر از ۵ اینچ ارائه می‌دهد، در کره‌های ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ اینچی از این روش و برای کره‌های ۲ و ۳ اینچی و حالت بدون کره از روش نیمه تجربی، که معمولاً پاسخ بهتری نسبت به روش مخروط سایه دارد، استفاده شده است و در نهایت، شمارش خالص برای هر کره به دست آمده است. در ادامه جداول نتایج آهنگ شمارش‌ها برای کره‌ها در حضور چشمه‌های $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf می‌آید. (جداول ۱ تا ۶) همچنین نمودار آهنگ شمارش خالص سامانه برحسب قطر کره‌های بانر برای چشمه‌های $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf آمده است (شکل ۲ و ۳).

۵.۲. نتایج شبیه‌سازی و محاسبه بردار پاسخ آشکارساز

توسط کد MCNPX

بردار پاسخ هر کره بانر، معمولاً از شبیه‌سازی مونت‌کارلو نتیجه می‌شود و عبارت است از شمارش‌های آشکارساز مرکزی، که

مختلف حاصل می‌شود که C_i^{calc} نامیده می‌شوند. این شمارش‌های محاسبه شده در مقایسه با شمارش‌های اندازه‌گیری شده از یک چشمه ناشناخته، خطاهایی را نشان می‌دهند، که این خطا اطلاعاتی را در حوالی طیف آزمایشی، برای شناخت طیف مجهول ایجاد می‌کند. سپس طیف آزمایشی، به طور تکراری تغییر داده می‌شود تا خطاها در مقایسه با عدم یقین‌های آماری به اندازه کافی کوچک شوند. این روش همگرایی، به کمینه کردن مقدار زیر منجر می‌شود

$$X^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \frac{(C_i - C_i^{\text{calc}})^2}{C_i}, \quad i=1, \dots, m \quad (12)$$

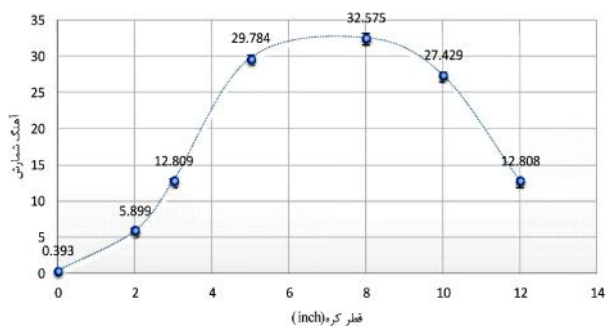
که در آن m تعداد قرائت‌های کره‌هاست، C_i شمارش اندازه‌گیری شده برای i امین کره است و C_i^{calc} شمارش i امین کره است که توسط کاربرد تابع پاسخ برای طیف آزمایشی به دست آمده و u_i انحراف استاندارد می‌باشد. این عدم یقین توسط آزمایش‌های معتبر تخمین زده می‌شود [۴]. تقریب و روش مربوط به حل معادله ماتریسی (۲) که در این تحقیق به کار برده شده است، روش تکرار می‌باشد. از کدهایی که براساس این روش طراحی شده‌اند می‌توان SANDII و SPUNIT را نام برد که در این پژوهش از نرم‌افزارهایی بر پایه کد SPUNIT استفاده شده است. الگوریتم SPUNIT را دوروشنکو و همکارانش با توسعه کد BUNKI ایجاد کردند [۱۱]. در مورد کد SPUNIT باید گفت که الگوریتم آن به الگوریتم SAND II شبیه است. الگوریتم آن از رابطه تکرار (۱۳) شروع می‌شود.

$$\ln \{j^{(k+1)}\} - \ln \{j^{(k)}\} = \sum_i \left[\ln(C_i) - \ln(C_i^{\text{calc}}) \right] \frac{W_{ij}^{(k)}}{c_i} \quad (13)$$

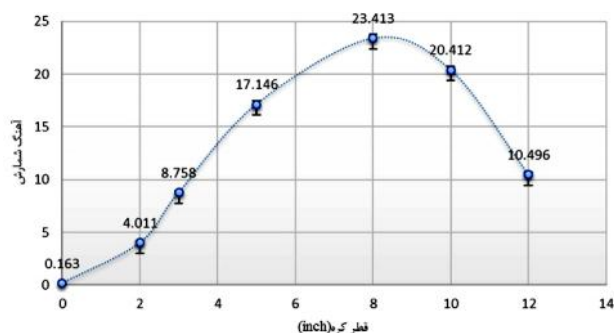
سمت راست معادله فوق، حول نقطه $C_i^{\text{calc}} = C_i + u_i^{\text{calc}}$ بسط می‌یابد که برای مرتبه اول آن داریم:

$$\{j^{(k+1)}\} = \{j^{(k)}\} \frac{\sum_i \frac{C_i R_{ij}^{(k)}}{c_i}}{\sum_i \frac{R_{ij}^{(k)}}{c_i}}, \quad (14)$$

که برابر با معادله استفاده شده در کد SPUNIT است [۱۲].



شکل ۳. نمودار آهنگ شمارش خالص سامانه برحسب قطر کره‌های بانر برای چشمه ^{252}Cf .



شکل ۲. نمودار آهنگ شمارش خالص سامانه برحسب قطر کره‌های بانر برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

جدول ۲. نتایج آهنگ شمارش کل برای چشمه ^{252}Cf .

قطر کره‌ها (inch)	آهنگ شمارش s^{-1}	انحراف معیار
بدون کره	۱۷۱٫۲	۱۰۵٫۰
۲	۵۸۳٫۱۸	۲۸۶٫۰
۳	۲٫۲۶	۳۳۳٫۰
۵	۰۵۴٫۴۰	۴۱۱٫۰
۸	۴۴۵٫۴۳	۴۲۹٫۰
۱۰	۷۶۶٫۳۱	۳۶۶٫۰
۱۲	۱۶۲٫۱۶	۲۶۰٫۰

جدول ۱. نتایج آهنگ شمارش کل برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

قطر کره‌ها (inch)	آهنگ شمارش s^{-1}	انحراف معیار
بدون کره	۷۹۱٫۴	۱۵۱٫۰
۲	۷۴۱٫۱۱	۲۳۳٫۰
۳	۳۷۹٫۱۵	۲۵۶٫۰
۵	۳۵۴٫۲۳	۳۱۲٫۰
۸	۹۷۵٫۲۷	۳۴۳٫۰
۱۰	۹۹۵٫۲۴	۳۲۵٫۰
۱۲	۹۵٫۱۲	۲۳۳٫۰

جدول ۴. نتایج آهنگ شمارش پراکندگی به روش مخروط سایه برای چشمه ^{252}Cf .

قطر کره‌ها (inch)	آهنگ شمارش s^{-1}	انحراف معیار
۵	۲۷۰٫۱۰	۲۱۱٫۰
۸	۸۷۰٫۱۰	۲۲۰٫۰
۱۰	۳۳۷٫۴	۱۳۸٫۰
۱۲	۳۵۴٫۳	۱۲۴٫۰

جدول ۳. نتایج آهنگ شمارش پراکندگی به روش مخروط سایه برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

قطر کره‌ها (inch)	آهنگ شمارش s^{-1}	انحراف معیار
۵	۱۰۸٫۶	۱۶۱٫۰
۸	۵۶۲٫۴	۱۴۲٫۰
۱۰	۵۸۳٫۴	۱۴۳٫۰
۱۲	۴۵۴٫۲	۱۰۴٫۰

جدول ۶. نتایج آهنگ شمارش خالص برای چشمه ^{252}Cf .

قطر کره‌ها (inch)	آهنگ شمارش s^{-1}	انحراف معیار
بدون کره	۳۹۳٫۰	۰۷۷٫۰
۲	۸۹۹٫۵	۱۹۳٫۰
۳	۸۰۹٫۱۲	۲۳۷٫۰
۵	۷۸۴٫۲۹	۴۶۲٫۰
۸	۵۷۵٫۳۲	۴۸۲٫۰
۱۰	۴۲۹٫۲۷	۳۹۱٫۰
۱۲	۸۰۸٫۱۲	۲۸۸٫۰

جدول ۵. نتایج آهنگ شمارش خالص برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

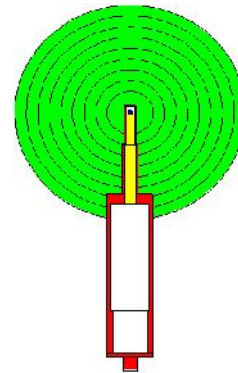
قطر کره‌ها (inch)	آهنگ شمارش s^{-1}	انحراف معیار
بدون کره	۱۶۳٫۰	۱۲۲٫۰
۲	۰۱۱٫۴	۱۴۶٫۰
۳	۷۵۸٫۸	۱۸۸٫۰
۵	۱۴۶٫۱۷	۳۵۱٫۰
۸	۴۱۳٫۲۳	۳۷۱٫۰
۱۰	۴۱۲٫۲۰	۳۵۵٫۰
۱۲	۴۹۶٫۱۰	۲۵۵٫۰

نوترون‌ها مستقیماً به کره برسند (فرض این است که، نوترون به آشکارساز نرسیده صفر باشد). پرتوهای نوترونی، چشمه‌های تک‌انرژی و تک‌سوی نوترونی در محدوده انرژی طیف پیوستار چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ از حرارتی تا 11 MeV و طیف پیوستار چشمه ^{252}Cf از حرارتی تا 15 MeV می‌باشند، که از مرجع استاندارد استخراج شده است [۱۰]. کمیت‌های مورد محاسبه در این برنامه شار نوترون در داخل سوسوزن و تعداد برهم‌کنش‌های (n) به ازای هر نوترون ورودی درون سوسوزن است. پاسخ‌ها همه به صورت تابعی از انرژی نوترون محاسبه می‌شوند. تالی‌های به کار رفته برای شمارش نوترون‌ها F4 بوده و دستور به کار رفته پیوستار چشمه ^{252}Cf از حرارتی تا 15 MeV می‌باشند که از مرجع استاندارد [۱۰]، استخراج شده است. کمیت‌های مورد محاسبه در این برنامه شار نوترون در داخل سوسوزن و تعداد برهم‌کنش‌های (n) به ازای هر نوترون ورودی درون سوسوزن است. پاسخ‌ها همه به صورت تابعی از انرژی نوترون محاسبه می‌شوند. تالی‌های به کار رفته برای شمارش نوترون‌ها F4 بوده و دستور به کار رفته برای تعداد برهم‌کنش‌ها FMn است. لازم به ذکر است که کلیه سطح مقطع‌های به کار رفته در برنامه از کتابخانه‌های ENDF و در دمای 300 کلوین (دمای اتاق) استفاده شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی شده و بردارهای پاسخ سامانه در حالات آشکارساز بدون کره بانر و آشکارساز همراه با کره‌های بانر ۲، ۳، ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ اینچی برحسب قطر کره‌ها، در ادامه نشان داده شده‌اند. (جداول ۷ و ۸) انحراف معیار از حاصل ضرب درصد خطا (خروجی کد MCNPX) در تابع پاسخ به دست آمده است. اندیس i نمایانگر شماره کره (حالت آشکارساز) می‌باشد.

۵.۳. محاسبه ضریب کالیبره کردن

در اینجا ضرایب کالیبره کردن سامانه برای هر دو چشمه محاسبه و سپس در نتایج تجربی اعمال شده و نتایج اصلاح شده آمده است. (جداول ۹ و ۱۰) اندیس i نمایانگر شماره کره (حالت آشکارساز) می‌باشد. همچنین نمودار پاسخ سامانه



شکل ۴. نمونه طرح رسم شده کره 10 اینچی به همراه آشکارساز. هندسه انشعاب به صورت دایره‌های هم مرکز دیده می‌شود [۱۳].

تابعی از انرژی نوترون‌هاست [۷]. برای محاسبه پاسخ سامانه طیف‌نگاری بانر، آشکارسازهای سامانه را در معرض طیف چشمه‌های استاندارد $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf توسط کد Version ۲٫۶٫۰ MCNPX شبیه‌سازی می‌کنیم.

کد MCNPX یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی در انجام محاسبات هسته‌ای است و براساس روش مونت‌کارلو کار می‌کند. این کد در طراحی راکتورهای هسته‌ای و بررسی ایمنی آنها، حفاظ‌سازی، طراحی آشکارسازها، چاه‌پیمایی هسته‌ای، طراحی هدف در شتاب‌دهنده‌ها، پرتوپزشکی و موارد دیگر کاربردهای بسیاری دارد. فایل ورودی از نظر هندسی مطابق با دستگاه تجربی و در محیط خلاء بدون هیچ پراکندگی طراحی شده است. شیوه استفاده شده برای کاهش واریانس و کمینه کردن خطاها در این کد، هندسه انشعاب (قطاع‌بندی) و رولت روسی و استفاده از پنجره‌های وزنی می‌باشد. در واقع روش هندسه انشعاب و رولت روسی برای افزایش اهمیت ذره ورودی با نزدیک شدن به محل محاسبه تالی می‌باشد [۱۳]. نمونه طرح رسم شده کره 10 اینچی به همراه آشکارساز، که هندسه انشعاب‌ها را به خوبی نشان می‌دهد، در شکل ۴ نمایش داده شده است [۱۴].

در این برنامه، شبیه‌سازی به صورتی است که کره‌ها در معرض یک دسته پرتوی نوترونی قرار می‌گیرند، به طوری که دسته پرتو عمود بر محور آشکارساز قرار می‌گیرد. چشمه را به صورت قرصی که شعاعش برابر با شعاع کره بانر است، در نظر می‌گیریم، زیرا پاسخ مطلق آشکارساز را می‌خواهیم و باید تمام

جدول ۷. محاسبه پاسخ سامانه درمقابل چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ توسط کد شبیه‌سازی MCNPX.

انحراف معیار	تابع پاسخ (cm^2) $R_i^{\text{Am-Be}}$	درصد خطا	شار	قطر کره‌ها (inch)
۰۶E-۳۷,۱	۰۴E-۶۱,۱	۰۰۸۵,۰	۰۴E-۰۵,۲	بدون کره
۰۴E-۹۰,۲	۰۳E-۷۰,۴	۰۶۱۷,۰	۰۴E-۳۲,۲	۲
۰۴E-۲۹,۵	۰۲E-۷۲,۲	۰۱۹۵,۰	۰۴E-۹۵,۵	۳
۰۴E-۷۸,۸	۰۱E-۱۰,۱	۰۰۸۰,۰	۰۴E-۶۶,۸	۵
۰۴E-۴۲,۶	۰۱E-۷۸,۱	۰۰۳۶,۰	۰۴E-۵۰,۵	۸
۰۴E-۵۵,۴	۰۱E-۶۸,۱	۰۰۲۷,۰	۰۴E-۳۲,۳	۱۰
۰۴E-۵۴,۳	۰۱E-۴۲,۱	۰۰۲۵,۰	۰۴E-۹۴,۱	۱۲

جدول ۸. محاسبه پاسخ سامانه درمقابل چشمه ^{252}Cf توسط کد شبیه‌سازی MCNPX.

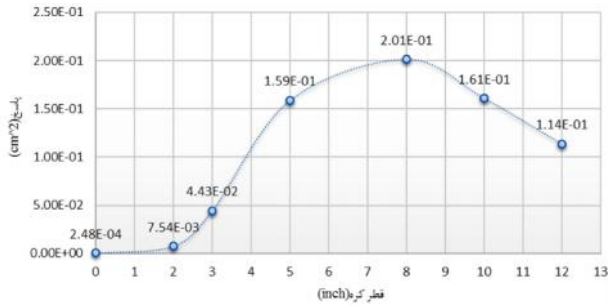
انحراف معیار	تابع پاسخ (cm^2) R_i^{C}	درصد خطا	شار	قطر کره‌ها (inch)
۰۶E-۵۴,۱	۰۴E-۴۸,۲	۰۰۶۲,۰	۰۴E-۱۵,۳	بدون کره
۰۴E-۶۴,۳	۰۳E-۵۴,۷	۰۴۸۲,۰	۰۴E-۷۲,۳	۲
۰۴E-۸۳,۶	۰۲E-۴۳,۴	۰۱۵۴,۰	۰۴E-۷۲,۹	۳
۰۳E-۰۵,۱	۰۱E-۵۹,۱	۰۰۶۶,۰	۰۳E-۲۵,۱	۵
۰۴E-۸۴,۶	۰۱E-۰۱,۲	۰۰۳۴,۰	۰۴E-۲۱,۶	۸
۰۴E-۵۰,۴	۰۱E-۶۱,۱	۰۰۲۸,۰	۰۴E-۱۷,۳	۱۰
۰۴E-۱۹,۳	۰۱E-۱۴,۱	۰۰۲۸,۰	۰۴E-۵۶,۱	۱۲

جدول ۹. ضرایب کالیبره کردن سامانه و نتایج تجربی اصلاح شده برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

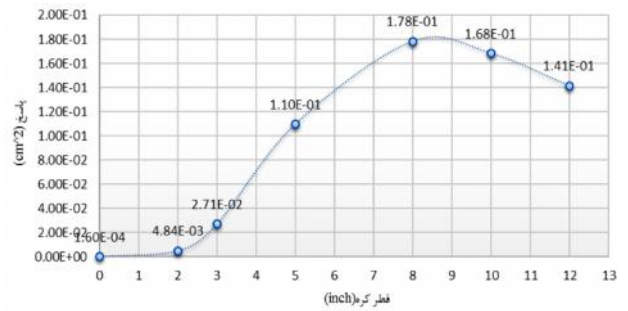
آهنگ شمارش (s^{-1})	f_i	قطر کره‌ها (inch)
۰۱۹,۰	۵۵,۸	بدون کره
۵۵۶,۰	۲۰۹,۷	۲
۲۱۹,۳	۷۲۰,۲	۳
۰۲۲,۱۳	۳۱۶,۱	۵
۰۷۲,۲۱	۱۱۱,۱	۸
۸۸۸,۱۹	۰۲۶,۱	۱۰
۸۱۰,۱۶	۶۲۴,۰	۱۲

جدول ۱۰. ضرایب کالیبره کردن سامانه و نتایج تجربی اصلاح شده برای چشمه ^{252}Cf .

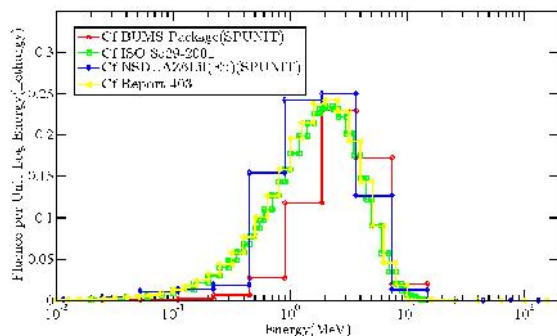
آهنگ شمارش (s^{-1})	f_i	قطر کره‌ها (inch)
۰۴۶,۰	۴۰۳,۸	بدون کره
۴۲۲,۱	۱۴۸,۴	۲
۳۵۵,۸	۵۳۳,۱	۳
۹۹۴,۲۹	۹۹۳,۰	۵
۹۲۲,۳۷	۸۵۹,۰	۸
۳۷۵,۳۰	۹۰۳,۰	۱۰
۵۲۶,۲۱	۵۹۵,۰	۱۲



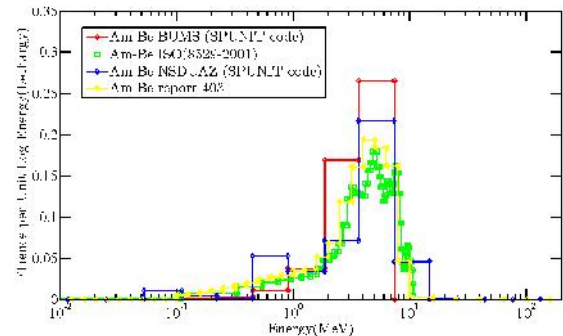
شکل ۶. نمودار پاسخ سامانه برحسب قطر کره‌ها در مقابل چشمه ^{252}Cf توسط کد شبیه‌سازی MCNPX.



شکل ۵. نمودار پاسخ سامانه برحسب قطر کره‌ها در مقابل چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ توسط کد شبیه‌سازی MCNPX.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه طیف‌های بازیابی شده ^{252}Cf با طیف‌های مراجع.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه طیف‌های بازیابی شده $^{241}\text{Am-Be}$ با طیف‌های مراجع.

[۱۷] جهت مقایسه در ادامه آمده است.

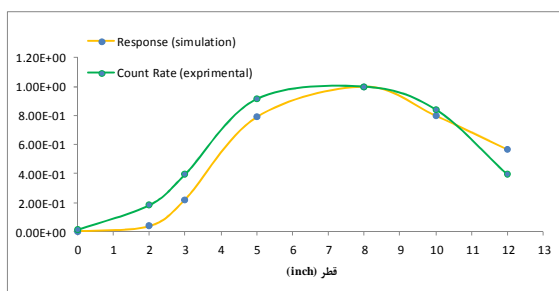
برحسب قطر کره‌ها در مقابل چشمه‌های ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ آمده‌اند. (شکل ۵ و ۶)

۶. نتیجه‌گیری

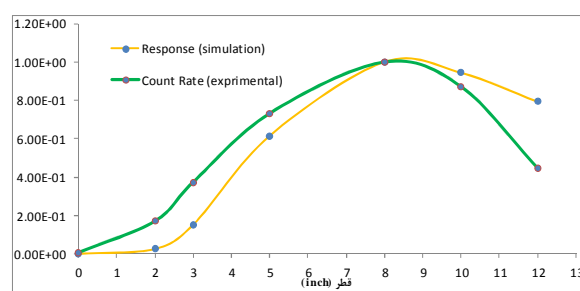
در این پژوهش، آهنگ شمارش خالص تجربی سامانه طیف‌نگاری بانر مجهز به آشکارساز $^6\text{Li(Eu)}$ با حذف اثرات پراکندگی به روش‌های مخروط سایه و نیمه‌تجربی در مقابل چشمه‌های پیوسته ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ به دست آمد. همچنین پاسخ آشکارساز و تک‌تک کره‌های کندکننده سامانه توسط کد MCNPX شبیه‌سازی و محاسبه شد. پس از آن با داشتن پاسخ و آهنگ شمارش سامانه و معلوم بودن شار چشمه، با استفاده از معادله منتج از انتگرال فردهلم، ضرایب کالیبره کردن سامانه به دست آمدند. سپس با اصلاح نتایج تجربی با ضرایب کالیبره کردن، نسبت به بازیابی طیف‌ها اقدام شد. با توجه به تطابق خوب طیف‌های به دست آمده دو چشمه ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ با طیف‌های استاندارد این دو چشمه در شکل‌های ۷ و ۸، برای

۵. ۴. بازیابی و استخراج طیف‌ها

در این قسمت با استفاده از نتایج تجربی سامانه، توسط کد SPUNIT نرم‌افزار NSDUAZ6Li(Eu) Ver. ۱.۰ [۱۵] و همچنین کد SPUNIT نرم‌افزار آنلاین BUMS package که به صورت رایگان بر روی اینترنت قابل دسترسی است [۱۶]، طیف چشمه‌های ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ بازیابی و استخراج شده است. طیف اولیه و ماتریس پاسخ نرم‌افزار NSDUAZ6Li(Eu) به صورت پیش‌فرض توسط برنامه انتخاب می‌شود. در کد آنلاین BUMS package نیز طیف اولیه، طیف ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$ استاندارد (E) ISO ۸۵۲۹:۱۹۸۹ و ماتریس پاسخ، $^4\text{U-ATA}$ University of Texas at Austin-Hertel and Davidson $4\text{mm}\times 4\text{mm}$ انتخاب شده است. نمودارهای طیف‌های استخراجی به همراه دو نمونه طیف استاندارد مراجع [۱۰] و



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی سامانه برحسب قطر کره‌های بانر در مقابل چشمه ^{252}Cf .



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی سامانه برحسب قطر کره‌های بانر در مقابل چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

تجربی و شبیه‌سازی باهم رسم شده است و نسبت به مقدار کره ۸ اینچی به‌نحیج گردیده است. در شکل ۹ برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ در مقایسه دیده می‌شود که، روند صعودی داده‌های تجربی در کره‌های ۲، ۳، ۵ و ۸ اینچی و نزول آن بعد از کره ۸ اینچی تا کره ۱۰ اینچی مطابقت کاملاً خوبی با منحنی حاصل از شبیه‌سازی دارد، و با توجه به این که میانگین انرژی چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ حدود ۴٫۴ مگا الکترون‌ولت می‌باشد، همانطور که انتظار می‌رود پاسخ بیشینه در کره ۸ اینچ دیده می‌شود. اما در منحنی تجربی کاهش شمارش در کره ۱۲ اینچ نسبت به شمارش کره ۵ اینچ در مقایسه با منحنی حاصل از شبیه‌سازی کمی مغایرت نشان می‌دهد. همچنین برای چشمه ^{252}Cf نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که روند صعودی داده‌های تجربی در کره‌های ۲، ۳، ۵ و ۸ اینچی و نزول آن بعد از کره ۸ اینچی تا کره ۱۲ اینچی مطابقت کاملاً خوبی با منحنی حاصل از شبیه‌سازی دارد و طبق مراجع و مقالات مطالعه شده، همان طور که انتظار می‌رود، پاسخ بیشینه در کره ۸ اینچ دیده می‌شود.

چشمه مجهولی که میانگین انرژی آن بین میانگین انرژی چشمه‌های مذکور است، ضریب کالیبره کردن بین بازه ضرایب کالیبره کردن به دست آمده خواهد بود. لازم به ذکر است اختلاف بین دو نوع طیف بازیابی شده به دلیل تفاوت در ماتریس پاسخ انتخابی و همچنین طیف اولیه ورودی در دو کد بازیابی است.

همچنین در خصوص گاما‌های تولیدی توسط نوترون چشمه‌های مورد بررسی در کره‌های پلی اتیلنی بانر و پاسخ آشکارساز سوسوزن $^6\text{LiI(Eu)}$ به آن، باید گفت به دلیل این که کانال‌های انرژی نوترون و گاما برای این نوع سوسوزن با هم هیچ گونه تداخلی ندارند، با کوچک کردن پنجره پایینی انرژی شمارشگر، شمارش این پرتوهای گاما عملاً حذف شد.

برای درک بهتر و مقایسه مناسب‌تر نتایج تجربی و محاسباتی، با توجه به این که آهنگ شمارش و پاسخ، با فرض این که آهنگ شمارش در واقع ضریبی از پاسخ است، هم‌سنخ و قابل قیاس هستند، دو نمودار مربوط به نتایج

مراجع

1. M Winter, P Beck and P Kindl, St Kerschbaumer, "Characterization of Radiation Detectors in Photon and High Energy Particle Fields", IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe, Prague (1997).
2. ن سولفانیدیس، «اندازه‌گیری و آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای»، انتشارات سیمین، ترجمه ر کوهی و م ه هادیزاده یزدی (۱۳۷۰).
3. G E Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons Inc, New York, (1999).
4. R Bedogni, "Neutron Spectrometry and Dosimetry for Radiation Protection Around a High Energy Electron/Positron Collider", Unidad Académica de Estudios Nucleares Universidad Autónoma de Zacatecas Ph. D. Thesis (2006).
5. P Goldhagen, "Bonner-Sphere Neutron Spectrometry", Environmental Measurements

- Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **476**, 1 (2002) 263.
12. J J Doroshenko, S N Kraitov, T V Kuznetsova, K K Kushnereva and E S Leonov, *Nuclear Technology* **33**, 4 (1977) 296.
 ١٣. ی کاسه ساز و م حسن زاده، «آموزش کد MCNP»، انتشارات گذار (١٣٩١).
 14. MCNP Visual Editor Version X_22S Software.
 15. H R Vega-Carrillo, J M Ortiz-Rodriguez, and M R Martinez-Blanco, *Applied Radiation and Isotopes* **71** (2012) 87.
 16. <http://nukeisit.gatech.edu>.
 17. International Atomic Energy Agency, “*Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes: Supplement to Technical Reports Series No. 318*”, Technical Reports Series 403, IAEA, Vienna (2001).
 - Laboratory, US Department of Energy, 28th Edition (1997).
 6. L Dresner, “*Principles of Radiation Protection Engineering*”, Oak Ridge National Laboratory, McGraw-Hill (1965).
 7. S Mukhopadhyay, and H R McHugh., “*Portable Gamma and Thermal Neutron Detector using ⁶LiI (Eu) Crystals*”, Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting, International Society for Optics and Photonics (2004) 73.
 8. <http://www.ludlums.com/component/virtuemart/neutron-detector-140-detail?activetab=specifications>
 9. ISO 8529-2 (2000).
 10. ISO 8529-1 (2001).
 11. J Sweezy, N Hertel, and K Veinot, “*BUMS-Bonner sphere Unfolding Made Simple: an HTML Based Multisphere Neutron Spectrometer Unfolding Package*”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerator