



نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵

## اندازه‌گیری شدت چشمه‌ی نوترون آمرسیوم- بریلیوم ( $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ )

اکبر عبدی سرای<sup>۱</sup>، محمد حسین استکی<sup>۲\*</sup>، جمشید خورسندی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه اصفهان  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه اصفهان  
<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور، گروه پژوهشی تسهیلات کاربردی

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۹ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۰)

### چکیده

از نوترون‌ها در تحقیقات و پژوهش‌های پزشکی، حفاظ‌سازی و مواد استفاده می‌شود. نوترون انتقال انرژی خطی، بیشتری دارد و در مقایسه با اشعه گاما، تابش خطرناکی در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از چشمه‌های نوترونی به دلیل بهره‌بالی نوترونی افزایش یافته است. یکی از این نوع چشمه‌ها که در بسیاری از مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی به طور گسترده به عنوان چشمه کالیبراسیون تابش نوترون استفاده می‌شود، چشمه  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  است. برای محاسبه آهنگ دز نوترون و گامای حاصل از چشمه  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ ، اندازه‌گیری شدت آن، یکی از کارهای ضروری و مهم است. شدت چشمه نوترون ( $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ ) توسط آشکارساز  $\text{BF}_3$  با روش انتگرال‌گیری فضایی تعیین گردیده و خطای آزمایش با تصحیحات اعمال شده توسط پولک‌های دیسپرسیوم و طلا به کمتر از ۱۰/۲۹٪ کاهش یافته است. همچنین چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ ، آشکارساز  $\text{BF}_3$  و تانک آب با روش مونت کارلو با کد  $\text{MCNPX2.7}$  شبیه‌سازی شد و محاسبات شبیه‌سازی، توافق خوبی با نتایج تجربی دارند.

**واژگان کلیدی:** فعال‌سازی نوترونی، چشمه نوترون، روش مونت کارلو، پولک طلا، آشکارساز یدور سدیم

\* اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای،

پست الکترونیکی: [m.esteki@eng.ui.ac.ir](mailto:m.esteki@eng.ui.ac.ir)

## ۱. مقدمه

نوترون تولید نمود، لذا این چشمه ها را گاهی چشمه های  $(\alpha, n)$  نیز می نامند. برای گسیل آلفا می توان از هسته های  $^{241}\text{Am}$ ،  $^{236}\text{Pu}$ ،  $^{210}\text{Po}$ ،  $^{226}\text{Ra}$  (و دخترانش) استفاده نمود. با توجه به اینکه چشمه  $\text{Ra-Be}$  گسیلنده گامای پر انرژی است، بنابراین بیشتر از چشمه های  $\text{Am-Be}$ ،  $\text{Po-Be}$  و  $\text{Pu-Be}$  استفاده می شود. نوترون های گسیل شده از چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  تک انرژی نبوده و دارای طیف انرژی پیوسته می باشند. مزیت اصلی چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  سطح انرژی خیلی پایین گامای گسیل شده از آن در مقایسه با چشمه های دیگر مثل  $\text{Ra-Be}$  بوده و در نتیجه به تناسب آن حفاظ سازی کمتری در برابر تابش گاما نیاز دارد. نوترون های سریع تولید شده توسط چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  دارای انرژی متوسط حدود  $4/5 \text{ MeV}$  و بیشینه انرژی  $11 \text{ MeV}$  هستند [۸].

## ۳. مشخصات چشمه نوترونی مورد استفاده

در این مقاله، از یک چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  با فعالیت ۵ کوری و شدت  $10^7 \times 1/1 \frac{n}{s}$  که در داخل کپسولی از جنس استیل به قطر ۳ و طول ۶ سانتی متر قرار گرفته، استفاده شده است. شکل (۱)، تصویر این چشمه نوترونی بدون حفاظ آهنی را نشان می دهد. در شبیه سازی با روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX2.7، شدت چشمه را در ورودی برنامه لحاظ نموده ایم [۹]. ولی در اندازه گیری به صورت تجربی با آشکارساز  $\text{BF}_3$ ، ابتدا فرض نموده ایم که شدت چشمه معلوم نیست و نتایج با این فرض به دست آمده اند، ولی در نهایت نتایج تجربی به دست آمده و تصحیح شده با شدت واقعی چشمه یعنی  $10^7 \times 1/1 \frac{n}{s}$  مقایسه شده و مقدار خطای آزمایش برآورد شده است.

چشمه نوترون به تجهیزاتی گفته می شود که گسیلنده نوترون بوده و یا فرآیند تولید باریکه نوترونی را دارا هستند. چشمه های نوترونی از نظر اندازه، انرژی و آهنگ گسیل نوترون، هزینه های ساخت، نگهداری و مقررات به کارگیری، با هم متفاوت هستند [۲، ۱]. مزیت اصلی این چشمه ها قابل حمل بودن و قیمت پایین آن ها در مقایسه با سایر چشمه ها مانند راکتور های هسته ای و دستگاه های مولد نوترون<sup>۱</sup> است. از شار به دست آمده از چشمه های نوترونی در زمینه های مختلف از جمله فعال سازی نوترونی، رادیوتراپی، رادیوگرافی و کالیبراسیون آشکارساز ها و دزیمتر های نوترونی استفاده می شود [۳-۵]. چشمه های نوترونی ثابت در راه اندازه گیری راکتور های قدرت و راکتور های زیربحرانی نقش اساسی و ضروری دارند [۶، ۷]، همچنین از این چشمه ها برای نوترون تراپی با بور، نیز استفاده می شود. بنابراین برآورد میزان دقیق دز دریافتی اپراتور های راکتور و کارکنان بیمارستان ها و مراکز پزشکی هسته ای که با این چشمه ها کار می کنند، ضروری و حیاتی می باشد [۳]. برای محاسبه دقیق مقدار دز، باید اطلاعات کافی از شدت چشمه های نوترونی و تابش های گسیل شده از آن ها داشته باشیم.

۲. چشمه های  $(\alpha, n)$ 

برهم کنش تولید نوترون توسط چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  به صورت رابطه (۱) است:



Q این واکنش برابر  $5/7 \text{ MeV}$  است. می توان گسیلنده های آلفا را به صورت پودر با  $^9\text{Be}$  مخلوط کرد و از طریق واکنش بالا

<sup>۱</sup> Neutron Generator

تغییر نکند، تعداد نوترون های گسیل شده از چشمه برابر تعداد نوترون های جذب شده در سیستم خواهد بود. بنابراین هیچ گونه نشت نوترون از سیستم وجود نخواهد داشت.

$$Q = 4\pi N \int_0^{\infty} r^2 dr \int_0^{E_{max}} \Phi(r, E) \sigma_{aH}(E) dE \quad (2)$$

در این رابطه [۱۰-۱۲]:

$r$  فاصله چشمه نوترون از چشمه (بر حسب سانتی متر)،

$N$  تعداد اتم های هیدروژن در واحد حجم،

$\sigma_{aH}(E)$  سطح مقطع میکروسکوپی جذب هیدروژن و

$\Phi(r, E)$  توزیع چگالی شار نوترونی با انرژی  $E$  در واحد انرژی

بر حسب فاصله.

در محیط کند کننده آب، چون نوترون ها بعد از حرارتی شدن جذب می گردند می توان صرفاً توزیع شار نوترون های حرارتی را در نظر گرفت، در این صورت رابطه (۲) به صورت زیر در می آید:

$$Q = 4\pi N \int_0^{\infty} \bar{\sigma}_{aH} \Phi(r) r^2 dr \quad (3)$$

اگر فرض کنیم آهنگ شمارش در فاصله  $r$  از چشمه،  $P(r)$  باشد خواهیم داشت:

$$P(r) = N_B \Phi(r) \bar{\sigma}_{aB} \quad (4)$$

در رابطه (۴):

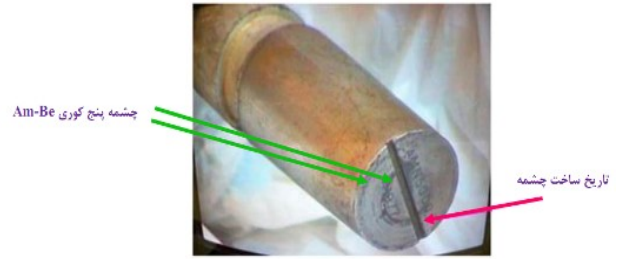
$N_B$  تعداد کل اتم های  $^{10}\text{B}$  در داخل آشکارساز نوترونی

$\bar{\sigma}_{aB}$  سطح مقطع متوسط جذب  $^{10}\text{B}$

با جای گذاری رابطه (۴) در رابطه (۳) خواهیم داشت:

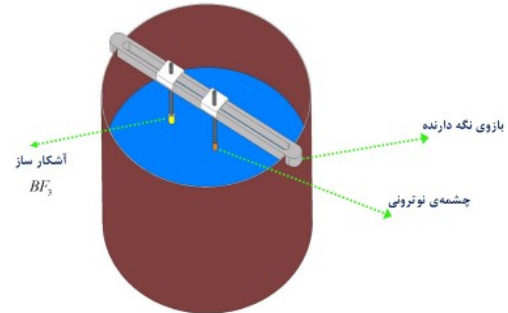
$$Q = \frac{4\pi N \bar{\sigma}_{aH}}{N_B \bar{\sigma}_{aB}} \int_0^{\infty} P(r) r^2 dr \quad (5)$$

روش های مختلفی برای اندازه گیری شدت یا قدرت یک چشمه نوترونی وجود دارد که عبارتند از [۱۴، ۱۳]:



شکل ۱. چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  بدون حفاظ آهنی

چشمه  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  در داخل حفاظی به شکل استوانه، از جنس آهن به قطر ۴۳ و ارتفاع ۱۵۳ میلی متر قرار گرفته است. این چشمه به همراه حفاظ آهنی در مرکز تانکی از جنس آهن به قطر ۱۰۴ و ارتفاع ۱۴۰ سانتی متر مطابق شکل (۲) قرار گرفته است. تانک با آب مقطر (به علت جلوگیری از تشکیل رسوب بر بدنه تانک) تا ارتفاع ۱۲۰ سانتی متر پر شده است و آشکار ساز  $\text{BF}_3$  داخل یک لوله آلومینیومی (برای جلوگیری از نفوذ آب به داخل آشکارساز) قرار داده شده است. فاصله آشکارساز از چشمه نوترونی به وسیله بازویی که بر روی تانک قرار دارد و با اتصالاتی که بر روی آن تعبیه شده است قابل تغییر است.



شکل ۲. تانک آب و نحوه قرار گرفتن چشمه نوترونی و آشکارساز  $\text{BF}_3$  در داخل آن

اگر یک چشمه نوترون به شدت  $Q$  در یک محیط بی نهایت بزرگ کند کننده، مثل آب قرار گیرد، نوترون ها توسط هیدروژن موجود در آب کند شده و تماماً جذب می گردند. در حالت پایدار یعنی در صورتی که آهنگ گسیل نوترون ها از چشمه با زمان

دارند که موجب ارجحیت بعضی از واکنش ها می شوند، از جمله:

۱: سطح مقطع انجام واکنش به صورت تابعی از انرژی، باید به خوبی شناخته شده باشد.

۲: نوع، انرژی و نسبت شاخه ای<sup>۱</sup> تابش های گسیل شده از محصول واکنش، کاملاً معلوم باشد.

۳: نیمه عمر رادیوایزوتوپ تولیدی باید به خوبی معلوم و بیش از چند دقیقه باشد؛ تا فرصت انتقال پولک به مکانی که تجهیزات و دستگاه های شمارش در آن قرار دارند، وجود داشته باشد.

برای اندازه گیری شدت چشمه نوترونی با روش اندازه گیری انتگرال فضایی، از حمام منگنز یا حمام آب، آشکارساز  $BF_3$  یا پولک استفاده می شود. در این مقاله، برای اندازه گیری شدت چشمه نوترونی، با بهره گیری از امکانات موجود از روش اندازه گیری فضایی توسط حمام آب و آشکارساز  $BF_3$  استفاده شده است. این نوع اندازه گیری توسط Valente [۱۷] با استفاده از آشکارساز  $BF_3$  کوچک (به قطر  $0.63$  و طول  $5$  سانتی متر) انجام شده و خطای گزارش شده  $20\%$  بوده است. در این آزمایش اگرچه از آشکارساز بزرگتر (به قطر  $2/5$  و طول  $20$  سانتی متر) استفاده شده است ولی با انجام تصحیحات لازم در دو مرحله، یکی جذب نوترون ها در خود چشمه نوترونی (با برون یابی منحنی بر اساس روند تئوری برای فواصل نزدیک به چشمه) [۱۰] و دیگری تصحیح ابعاد بزرگ آشکارساز با پولک های دیسپرسیوم، خطا به  $10\%$  درصد کاهش یافته است. همچنین به منظور شبیه سازی دقیق با روش مونت کارلو، لازم بود ابعاد آشکارساز نوترونی  $BF_3$  و ناحیه حساس آن مشخص شود. با استفاده از دستگاه تصویربرداری صنعتی اشعه ایکس، این کار انجام گرفت و تمام مشخصات آشکارساز برای شبیه سازی

۱: انتگرال گیری فضایی آهنگ جذب نوترون های حرارتی حاصل از چشمه در یک محیط بی نهایت از کند کننده و استنتاج قدرت چشمه با استفاده از سطح مقطع های شناخته شده.

۲: اندازه گیری چگالی شار نوترون سریع در فاصله مشخص از چشمه و محاسبه قدرت چشمه با استفاده از شکل هندسی.

۳: تعیین قدرت چشمه با استفاده از اندازه گیری ذرات وابسته در واکنش تولید نوترون.

۴: اندازه گیری قدرت چشمه به وسیله ارتباط آن با میزان انرژی آزاد شده در محیط.

۵: تعیین قدرت چشمه از طریق مقایسه آن با چشمه استاندارد.

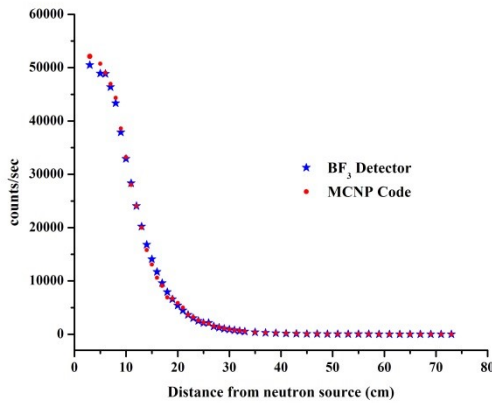
برای اندازه گیری شار نوترون روش های مختلفی وجود دارد که از جمله، اندازه گیری شار با استفاده از ذره همراه [۲]، همچنین استفاده از روش فعال سازی پولک ها با نوترون و به کارگیری برخی از آشکارساز های نوترونی مانند سوسوزن های آلی مایع مانند NE-213 می باشد [۱۶، ۱۵].

### ۳. ۱. اساس روش فعال سازی با نوترون

آشکارسازی نوترون توسط آشکارسازهای آستانه ای بر پایه تولید یک رادیوایزوتوپ، به وسیله اندرکنش نمونه با نوترون و شمارش تابش گسیل شده از آن است. آشکارسازهای آستانه ای به صورت پولک یا سیم فلزی هستند و در اندازه گیری های شار میدان نوترونی اهمیت خاصی دارند که بسته به انرژی نوترون از پولک های مختلفی که دارای انرژی آستانه ای متناسب با انرژی نوترون مورد نظر می باشند، استفاده می شود. به طور کلی، واکنش های آستانه ای بر پایه گستره انرژی نوترون و تجهیزات شمارش قابل دسترس انتخاب می شوند، ولی معیارهایی وجود

<sup>۱</sup> Branching Ratio

مشخص است، نتایج توافق خوبی با هم دارند. مشخصات فیزیکی پولک های مورد استفاده در آزمایش در جدول (۱) آورده شده است.



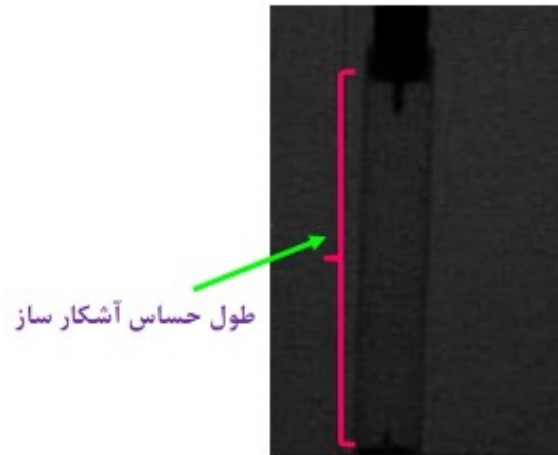
شکل ۴. توزیع شار نوترون های حرارتی یا  $P(r)$  بر حسب فاصله از چشمه  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  با استفاده از آشکارساز  $\text{BF}_3$ ، و نتایج حاصل از کد  $\text{MCNPX2.7}$

جدول ۱. مشخصات فیزیکی پولک ها

مشخصات فیزیکی			نام پولک
درصد خلوص (%)	ضخامت (mm)	سطح مقطع فعالسازی (barn)	
۹۹/۹۹۱۸	۰/۰۲۵	۹۹/۷	طلا (Au)
۹۹/۹	۰/۱۲۷	۹۲۰	دیسپرسیوم (Dy - Al)

برای شمارش پرتو بتای حاصل از پولک های فعال شده دیسپرسیوم، از آشکارساز گایگر مدل BC4 ساخت شرکت Eberline استفاده شد. همچنین برای شمارش گامای آن از آشکارساز  $\text{NaI(Tl)}$  به ابعاد  $7/5 \times 7/5$  سانتی متر که در داخل حفاظی از سرب قرار گرفته، استفاده شده است. از چشمه های سدیم، سزیم و کبالت به عنوان چشمه های نقطه ای استاندارد گاما جهت کالیبراسیون آشکارساز یدور سدیم استفاده گردید که مشخصات آن ها در جدول (۲) آورده شده است.

به دست آمد. شکل (۳)، تصویر رادیوگرافی آشکارساز  $\text{BF}_3$  توسط دستگاه مولد اشعه ایکس را نشان می دهد.



شکل ۳. تصویر رادیوگرافی تهیه شده از آشکارساز نوترونی  $\text{BF}_3$

آشکارساز  $\text{BF}_3$  را در استوانه ای از جنس آلومینیوم به قطر ۳ سانتی متر قرار داده و سپس آشکارساز را از نزدیک ترین فاصله از چشمه (فاصله بین مرکز آشکارساز تا مرکز چشمه، ۵ سانتی متر می باشد) تا فاصله ۴۴ سانتی متری، جا به جا نموده و در هر فاصله شمارش ها را ثبت می نمایم. به علت نشت نوترون ها در فاصله های نزدیک به دیواره تانک، محل آشکارساز را در فاصله ۴۰ سانتی متری از چشمه مجدداً ثابت نگه داشته و این بار چشمه را با گام های ۲ سانتی متری از آشکارساز دور می نمایم. این اندازه گیری تا فاصله ۷۲ سانتی متری ادامه می یابد. نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است. در هر فاصله مشخص از چشمه، شمارش ها ۱۰ بار تکرار شدند و مقدار متوسط شمارش ها در هر فاصله به دست آمد. مدت زمان هر شمارش ۱۰۰ ثانیه می باشد.

همچنین هندسه موجود در شکل (۲)، یعنی چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ ، آشکارساز  $\text{BF}_3$  و تانک آب با استفاده از کد  $\text{MCNPX2.7}$  شبیه سازی و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از آشکارساز  $\text{BF}_3$  مقایسه گردید. همان طور که در شکل (۴)

جدول ۲. چشمه های نقطه ای مورد استفاده برای کالیبراسیون

آشکارساز یدور سدیم NaI(Tl)

نام چشمه	تاریخ ساخت	فعالیت (میلی کوری)	نیمه عمر (روز)	انرژی فوتون گاما (keV)	شدت (%)
$^{137}\text{Cs}$	۲۰۱۳/۰۲/۰۸	۰/۰۰۲۷	۱۱۰۰۹	۶۶۲	۸۴/۶
$^{22}\text{Na}$	۲۰۱۳/۰۲/۰۸	۰/۰۰۲۷	۹۵۰/۳۴	۱۲۷۴/۵۴ ۵۱۱	۹۹/۹۴ ۱۸۰
$^{60}\text{Co}$	۲۰۱۳/۰۲/۰۸	۰/۰۰۲۷	۱۹۲۵/۲	۱۱۷۳/۲۳ ۱۳۳۲/۵۰	۹۹/۸۷ ۹۹/۹۸

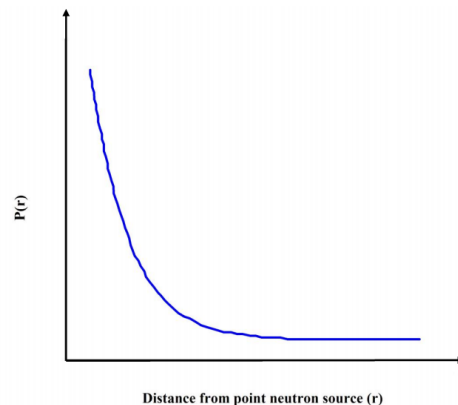
۳. ۲. محاسبه ی شار نوترون با استفاده از پولک های دیسپرسیوم

به دلیل اینکه آشکارساز  $\text{BF}_3$  مورد استفاده دارای ابعاد نسبتاً بزرگی است و مانند یک آشکارساز نقطه ای عمل نمی کند لازم است با استفاده از آشکارسازهای نقطه ای (پولک دیسپرسیوم)، تصحیحات لازم اعمال گردد. بنابراین از ۱۰ عدد پولک دیسپرسیوم که در ۲ مرحله و در فواصل مختلف از چشمه (بار اول ۱۰ عدد از فاصله ۱ تا ۱۰ سانتی متری و بار دوم از فاصله ۱۱ تا ۲۰ سانتی متری از چشمه)، فعال شده اند استفاده گردید. همچنین نحوه واپاشی پولک دیسپرسیوم فعال شده در جدول (۳) نشان داده شده است.

همان طور که می دانیم توزیع شار نوترون های حرارتی از یک چشمه نقطه ای بدون جذب (حالت ایده آل) در کند کننده به صورت شکل (۵) می باشد [۱۰]:

جدول ۳. نحوه واپاشی پولک دیسپرسیوم فعال شده

ایزوتوپ پدیدار	فراوانی (%)	سطح مقطع (barn)	رادایوتروپ تولید شده	نیمه عمر	انرژی فوتون گاما (MeV)
$^{157}\text{Dy}$	۰/۰۵۲۴	۹	$^{157}\text{Dy}$	۸/۰۶ ساعت	۰/۳۳ ۰/۱۸ ۰/۰۸
$^{158}\text{Dy}$	۰/۰۹۰۲	۹۶	$^{159}\text{Dy}$	۱۴۴ روز	۰/۰۵۸
$^{164}\text{Dy}$	۲۸/۱۸	۵۰۰ ۲۲۰۰	$^{165m}\text{Dy}$ $^{165}\text{Dy}$	۱/۲۵ دقیقه ۲/۳۶ ساعت	۰/۱۰۸ ۰/۰۴۶ ۰/۳۶ ۰/۲۷ ۰/۰۸۵



شکل ۵. توزیع شار نوترون های حرارتی از یک چشمه نقطه ای

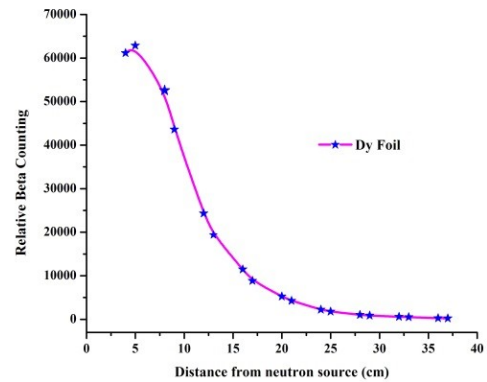
از مقایسه شکل (۴) و (۵) مشاهده می شود که تغییرات شار در نزدیک چشمه از حالت ایده آل تبعیت نمی کند، علت این امر جذب نوترون های حرارتی در حفاظ چشمه می باشد. برای بر طرف نمودن این مشکل لازم است منحنی شکل (۴) را در نواحی نزدیک چشمه با روند منحنی شکل (۵) ادامه دهیم. مقادیر تصحیح شده برای نتایج تجربی حاصل از اندازه گیری آشکارساز  $\text{BF}_3$  در جدول (۴) نشان داده شده است.

نتایج بتای اندازه گیری شده توسط آشکارساز بتا در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال تصحیحات انجام شده برای

آشکارساز  $\text{BF}_3$  توسط پولک Dy

فاصله از چشمه (cm)	شمارش حاصل از روی منحنی تهیه شده توسط پولک Dy	شمارش حاصل از روی منحنی تهیه شده توسط $\text{BF}_3$	نسبت شمارش $\text{BF}_3$ به Dy	ضریب تصحیح شمارش $\text{BF}_3$ به استفاده از پولک	نسبت به فاصله با استفاده از پولک	شمارش آشکارساز $\text{BF}_3$ با احتساب ضریب k
۱	۱۶۳۵۰۰	۸۵۹۱۶	۱/۹	۲/۰۴		۱۷۵۲۶۸
۲	۱۴۱۶۰۰	۸۰۱۶۵	۱/۷۶	۱/۹۰		۱۵۲۳۱۳
۳	۱۲۳۶۰۰	۷۴۳۹۸	۱/۶۶	۱/۷۸		۱۳۲۴۲۸
۴	۱۰۶۲۰۰	۶۸۶۹۳	۱/۵۴	۱/۶۵		۱۱۳۲۵۴
۵	۹۰۰۰۰	۶۲۸۸۰	۱/۴۳	۱/۵۳		۹۶۲۰۶
۶	۷۶۸۰۰	۵۷۱۲۱	۱/۳۴	۱/۴۴		۸۲۲۵۴
۷	۶۴۸۰۰	۵۱۳۶۲	۱/۲۶	۱/۳۵		۶۹۳۳۸
۸	۵۳۱۰۰	۴۵۶۰۳	۱/۱۶	۱/۲۴		۵۶۵۴۷
۹	۴۳۵۰۰	۳۹۵۴۴	۱/۱۰	۱/۲۰		۴۷۴۵۲
۱۰	۳۷۸۰۰	۳۳۶۸۵	۱/۱۲	۱/۱۸		۳۹۷۴۸
۱۱	۳۰۸۴۰	۲۸۳۲۵	۱/۰۸	۱/۱۶		۳۲۸۵۷
۱۲	۲۴۳۶۰	۲۴۰۴۵	۱/۰۱	۱/۰۸		۲۵۹۶۸
۱۳	۱۹۴۷۰	۲۰۱۸۹	۰/۹۶	۱/۰۳		۲۰۷۹۴
۱۴	۱۵۹۰۰	۱۶۸۱۲	۰/۹۴	۱/۰۱		۱۶۹۸۰
۱۵	۱۳۱۴۰	۱۴۰۸۲	۰/۹۳	۱/۰		۱۴۰۸۲
۱۶	۱۰۸۹۰	۱۱۷۱۲	۰/۹۲	۱/۰		۱۱۷۱۲
۱۷	۸۸۵۰	۹۵۸۷	۰/۹۲	۱/۰		۹۵۸۷
۱۸	۷۳۸۰	۷۹۰۷	۰/۹۳	۱/۰		۷۹۰۷
۱۹	۶۱۲۰	۶۵۶۱	۰/۹۳	۱/۰		۶۵۶۱
۲۰	۵۰۷۰	۵۴۹۶	۰/۹۲	۱/۰		۵۴۹۶

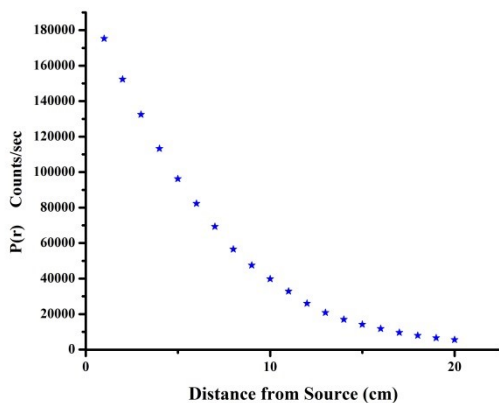


شکل ۶. تغییرات شمارش پرتوهای بتا بر حسب فاصله از چشمه  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  با استفاده از پولک های دیسپرسیوم

همان طور که در شکل (۶) دیده می شود در فاصله های نزدیک به چشمه اثرات جذب نوترون های حرارتی توسط چشمه نوترون دیده می شود. با امتداد منحنی در نواحی نزدیک به چشمه این اثر حذف گردیده است. نتایج استخراج شده از شکل (۶) در نظر گرفتن تصحیحات در جدول (۴) آمده است.

۳.۳. تهیه منحنی تصحیح شده توزیع شار نوترون حرارتی توسط آشکارساز  $\text{BF}_3$

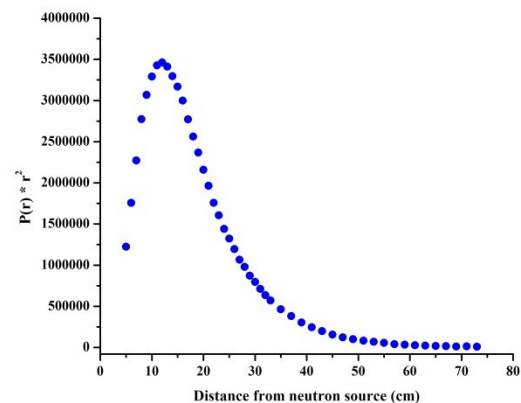
همان طور که در جدول (۴) مشاهده می گردد نسبت شمارش حاصل از پولک دیسپرسیوم به آشکارساز  $\text{BF}_3$  در فاصله های دور از چشمه تقریباً یک می باشد. در حالی که هر چه فاصله از چشمه کاهش می یابد این نسبت افزایش می یابد. این مقادیر نسبت به فاصله های دور از چشمه، نرمالیزه گردیده و ضریب تصحیح به دست آمده در جدول (۴) آورده شده است. این ضرایب تصحیح، شمارش حاصل از آشکارساز  $\text{BF}_3$  را در فاصله های نزدیک، مانند یک آشکارساز نقطه ای تصحیح می کند. شکل (۷) نشان دهنده توزیع شار نوترونی بر حسب فاصله از چشمه، (فاصله های نزدیک به چشمه نوترون) بعد از تصحیحات انجام شده را نشان می دهد.



شکل ۷. منحنی تغییرات  $P(r)$  بر حسب فاصله از چشمه (فاصله های نزدیک به چشمه نوترون) بعد از تصحیحات انجام شده

## ۳. ۴. محاسبه سطح زیر منحنی توزیع شار نوترون حرارتی

با استفاده از نتایج جدول (۴) می توان مقدار  $P(r) \times r^2$  را برای فاصله های مختلف از چشمه نوترونی محاسبه و با استفاده از نتایج به دست آمده، شکل (۸) را رسم نمود و سپس با استفاده از قانون سیمپسون [۱۸] می توان سطح زیر منحنی شکل (۸) را به دست آورد. سطح زیر منحنی با استفاده از این قانون  $\frac{n}{s} \times 7/429$  به دست می آید.

شکل ۸. منحنی تغییرات  $P(r) \times r^2$  بر حسب فاصله از

چشمه نوترونی

مقدار  $N_B$  با استفاده از قانون گازهای کامل و بر حسب داده های گاز  $BF_3$  داخل آشکارساز تعیین می گردد. با مشخص شدن سطح زیر منحنی شکل (۸) و با استفاده از رابطه (۵) می توان شدت چشمه نوترون را با تعیین پارامترهای مربوطه به دست آورد.

برای بدست آوردن اتم های  $^{10}B$  ( $N_B$ ) با استفاده از قانون گاز های کامل داریم:

$$N_B = \left(\frac{P_0 V_0 T_1}{P_1 V_1 T_0}\right) N_{AV} \times (\%96) \quad (6)$$

با قرار دادن مشخصات مربوط به آشکارساز  $BF_3$ ، در رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$N_B = \frac{(700)(54.67)(273)}{(760)(22412)(293)} \times 6.022 \times 10^{23} \times (\%96) = 1.21 \times 10^{21} \quad (7)$$

برای به دست آوردن تعداد اتم های هیدروژن در واحد حجم ( $N_H$ ) از رابطه (۷) استفاده می کنیم:

$$N_H = \left(\frac{2\rho(H_2O)N_{AV}}{M(H_2O)}\right) = 6.68 \times 10^{22} \frac{atom}{cm^3} \quad (7)$$

با توجه به سطح مقطع جذب هیدروژن (۰/۳۳۲b)، و سطح مقطع جذب بور (۳۸۱۸b) در انرژی حرارتی [۲۰، ۱۹]، مقادیر  $N_H$ ،  $N_B$  و با استفاده از رابطه (۵)، مقدار  $Q = 4.48 \times 10^6 \frac{neutron}{sec}$  به دست می آید.

رابطه (۵) با فرض اینکه بازده آشکارساز  $BF_3$ ، ۱۰۰٪ باشد معتبر می باشد. اما در عمل به دلایل مختلفی از جمله اغتشاش و جذب نوترون ها در دیواره آشکارساز، با کاهش شار نوترون مواجه می شویم. از این رو لازم است بازده عملی آشکارساز  $BF_3$  در رابطه (۵) وارد شود. برای این منظور از پولک های طلا برای تعیین بازده آشکارساز  $BF_3$  استفاده شده است.

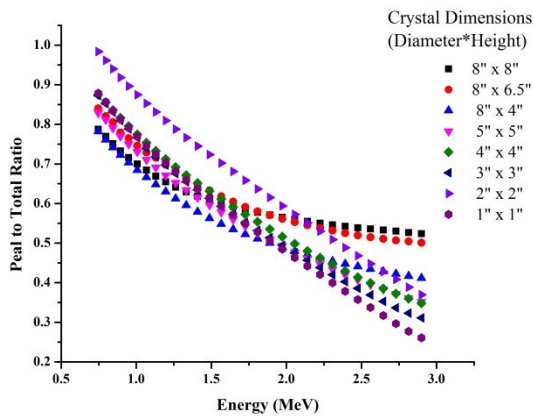
۳. ۴. ۱. اندازه گیری بازده آشکارساز نوترونی  $BF_3$ 

چون آشکارساز به کار برده شده در این آزمایش نسبتاً بزرگ می باشد، لازم است برای اندازه گیری بازده آشکارساز  $BF_3$ ، در تمام طول حساس آشکارساز از چندین پولک طلا (شکل (۹)) با خلوص ۹۹/۹۹٪ به قطر میانگین ۱/۴۷۶ سانتی متر و ضخامت ۰/۰۰۵۰۸ سانتی متر استفاده شود که در محور مرکزی ماکتی از  $BF_3$  قرار میگیرند. فعالیت تمام پولک ها توسط آشکارساز  $NaI(Tl)$  اندازه گیری شده است.

۳. ۴. ۲. فعال سازی پولک های طلا روی ماکت  $BF_3$ 

ماکتی از مقوا به ابعاد آشکارساز  $BF_3$  ساخته شد و در سرتاسر محور مرکزی آن تعداد ۵ عدد پولک طلا (شکل شماره (۹)) قرار داده شد، به طوری که پولک ها طول حساس  $BF_3$  را پوشش دهد. این ماکت در فاصله ۱۴ سانتی متری از چشمه (در محلی





شکل ۱۱. نسبت پیک به کل طیف بر حسب انرژی برای آشکارساز  $\text{NaI}(\text{TI})$  در ابعاد مختلف برای فاصله ۱۰ سانتی متری

برای بررسی صحت کاربرد منحنی های بازده از چشمه های نقطه ای در فاصله ۱۰ سانتی متری از آشکارساز  $\text{NaI}(\text{TI})$  استفاده شده است. نتایج حاصل از این بررسی ها در جدول (۵) آورده شده است. همان طور که از جدول مشاهده می شود حداکثر خطا در تعیین شمارش کمتر از ۱۰٪ می باشد.

جدول ۵. نتایج حاصل از اندازه گیری فعالیت چشمه های استاندارد گاما با استفاده از منحنی بازده استخراج شده از مرجع [۲].

نوع چشمه	انرژی و شدت آن بر حسب $\text{keV}$	فعالیت فعلی $(\frac{\text{dis}}{\text{sec}})$	سطح زیر پیک	راندمان آشکارساز $\text{NaI}$	نسبت پیک به کل شمارش	فعالیت اندازه گیری شده $(\frac{\text{dis}}{\text{sec}})$	خطای نسبی بر حسب درصد (%)
$^{22}\text{Na}$	۱۲۷۴ (۱۰۰)	۱۲۸۳	۶/۶۹۷	۰/۰۱۶۵	۰/۳۱	۱۳۰۴	۲
	۵۱۱ (۱۸۰)	۱۲۸۳	۲۸/۴۵	۰/۰۲۱۵	۰/۶۰۷	۱۲۰۹	۵
$^{60}\text{Co}$	۱۳۳۲ (۱۰۰)	۷۵۹۸	۳۸/۵۳	۰/۰۱۶۴	۰/۳	۷۸۲۶	۳
$^{137}\text{Cs}$	۶۶۲ (۸۴/۶)	۲۸۰۰۲	۲۶۲/۵	۰/۰۱۹۷	۰/۵۱۸	۳۰۳۶۴	۸

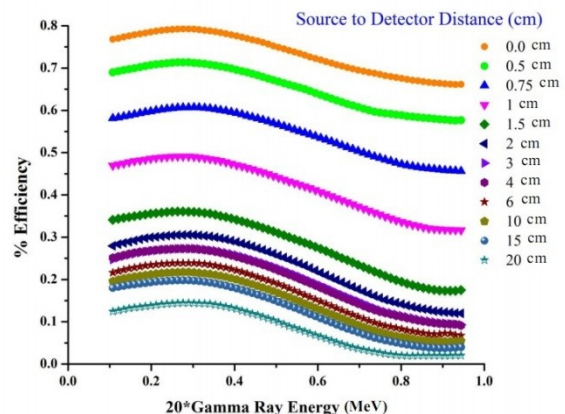
که آشکار ساز  $\text{BF}_3$  ، ۱۶۲۵۵ شمارش در ثانیه را نشان می دهد) به مدت ۷۲/۵ ساعت قرار گرفت. جهت تعیین فعالیت پولک ها لازم است که آشکارساز  $\text{NaI}(\text{TI})$  کالیبره شده و مورد استفاده قرار بگیرد. هر پولک در یک محفظه نگه دارنده از جنس آلومینیوم قرار گرفته و سپس بر روی ماکت چیده شد.



شکل ۹. پولک های طلای استفاده شده بر روی ماکت

### ۳.۴. کالیبراسیون آشکارساز $\text{NaI}(\text{TI})$

به دلیل عدم دسترسی به چشمه استاندارد برای تعیین بازده آشکارساز در انرژی ۴۱۲ keV گامای مربوط به پولک طلای موجود، لازم است از منحنی های بازده آشکارساز یدور سدیم استفاده شود [۲]. این منحنی ها در شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. بازده محاسبه شده برای آشکارساز  $\text{NaI}(\text{TI})$  به ابعاد

۷/۵ × ۷/۵ سانتی متر در فاصله های مختلف

جدول ۶. پارامترها و مقادیر استفاده شده در رابطه (۸)

پارامتر اندازه گیری شده	نماد	مقدار اندازه گیری شده
شمارش زمینه	$B$	۲۸۰۶
سطح زیر پیک با انرژی E	$C$	۳۸۶۹/۴۶
جرم پولک به گرم	$m$	۰/۴۰۳
ثابت تلاشی ( $s^{-1}$ )	$\lambda$	$۲/۹۸۲ \times ۱۰^{-۶}$
عدد آوگادرو	$N_{av}$	$۶/۰۲۲ \times ۱۰^{-۶}$
سطح مقطع فعالسازی در انرژی ۰/۰۲۵ eV ( $cm^{-2}$ )	$\sigma_0$	$۹۹/۷۴ \times ۱۰^{-۲۴}$
سطح مقطع متوسط فعال سازی ( $cm^{-2}$ )	$\bar{\sigma}$	$۸۸/۴۲ \times ۱۰^{-۲۴}$
جرم اتمی (gr)	$M$	۱۹۷/۹۶۸
درصد فراوانی	$\eta$	۱۰۰٪
راندمان ذاتی	$\epsilon_E$	۰/۰۲۳۴
نسبت پیک به کل	$P_T$	۰/۷۰۸
شدت فوتون ها با انرژی E	$I$	۰/۹۵۵۳
زمان پرتو دهی (h)	$t_i$	۷۵/۵
زمان تلف شده تا شروع آزمایش (sec)	$t_d$	۴۲۰
زمان شمارش (sec)	$t_c$	۴۰۰۰

با قرار دادن مقادیر جدول (۶) در رابطه (۸) مقدار شار مطلق

$$\text{نوترون برابر با } \frac{7767 \text{ neutron}}{cm^2 \cdot s} \text{ به دست خواهد آمد.}$$

با مشخص شدن مقدار شار مطلق نوترون توسط پولک طلا و داشتن شمارش حاصل از آشکارساز نوترونی  $BF_3$  در همان محل ( $\frac{16255 \text{ C}}{s}$ )، حساسیت عملی آشکارساز نوترون  $BF_3$  که نسبت شمارش حاصل از آشکارساز به شار نوترون حرارتی می باشد برابر خواهد شد با:

$$\text{حساسیت عملی} = \frac{16255}{7767} = 2/093$$

واحد حساسیت عملی، شمارش در ثانیه بر واحد شار نوترون می باشد. حساسیت تئوری آشکارساز  $BF_3$  نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{حساسیت تئوری} = \sigma_{ab} N_B = 3813 \times 10^{-24} \times 1/21 \times 10^{21} = 4/614$$

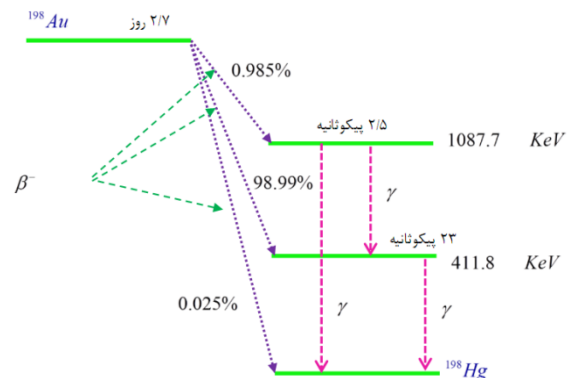
که واحدش برابر شمارش در ثانیه بر واحد شار نوترون است.

### ۳.۵. محاسبه شار مطلق نوترون با استفاده از پولک طلا

با قرار دادن پولک های فعال شده طلا (۵ عدد) بطور پیوسته در فاصله ۱۰ سانتی متری از آشکارساز NaI(Tl) سطح زیر پیک مربوط به انرژی گامای ۴۱۲ keV تعیین و بر اساس آن شار مطلق نوترون، با استفاده از منحنی های شکل (۱۰)، (۱۱) و رابطه (۸) محاسبه گردید.

$$\Phi = \frac{(C - B)\lambda \times M}{N_{Av} \sigma \eta \epsilon_E P_T m \times I \times (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (8)$$

در اثر جذب نوترون حرارتی توسط طلا، واکنش  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  صورت می گیرد [۲۱]. شکل (۱۲) طرح واپاشی عنصر طلا فعال شده ( $^{198}\text{Au}$ ) را نشان می دهد.



شکل (۱۲): طرح واپاشی عنصر طلا فعال شده

همان طور که از شکل (۱۲) مشاهده می شود در واپاشی  $^{198}\text{Au}$  یک تابش گامای ۴۱۱/۸ keV با احتمال بیش از ۹۵/۵۴٪ گسیل می شود که در اندازه گیری شار نوترون به روش فعال سازی پولک حائز اهمیت است. البته دو تابش گامای دیگر با انرژی ۱۰۸۷/۷ keV و ۶۷۵/۹ keV به ترتیب با احتمال ۰/۱۵۹٪ و ۰/۸۰۴٪ گسیل می شود که معمولاً در طیف نگاری گاما استفاده نمی شوند [۲۱]. فعالیت پولک پرتو دیده متناسب با شار نوترون است. همچنین پارامترها و مقادیر استفاده شده در رابطه (۸) در جدول (۶) آورده شده است.

$\text{BF}_3$  و تانک آب نیز با کد MCNPX2.7 که به روش مونت کارلو مسئله را حل می کند، شبیه سازی شد که نتایج قابل قبولی در مقایسه با نتایج حاصل از آشکارساز  $\text{BF}_3$  به دست آمد.

از مقایسه حساسیت عملی با حساسیت تئوری می توان بازده آشکارساز  $\text{BF}_3$  مورد استفاده در این اندازه گیری را به دست آورد.

$$\text{بازده} = \frac{2/0.93}{4/614} \times 100 = 45/4\%$$

اگر بازده به دست آمده برای آشکارساز  $\text{BF}_3$  را در شدت محاسبه شده برای چشمه ی نوترونی ( $Q = 4/48 \times 10^6 \frac{\text{neutron}}{\text{sec}}$ ) را لحاظ نمائیم، مقدار شدت چشمه نوترون برابر خواهد بود با:

$$Q = \frac{4/48 \times 10^6}{0.454} = 0.9868 \times 10^7 \left(\frac{n}{s}\right) \quad (9)$$

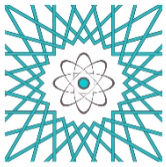
#### ۴. بحث و نتیجه گیری

برای تعیین شدت چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  به روش انتگرال فضایی از دو روش استفاده شد. اندازه گیری به وسیله آشکارساز نوترونی  $\text{BF}_3$  و اندازه گیری به روش فعال سازی پولک دیسپرسیوم. اگرچه در حالت کلی در اندازه گیری با روش دوم نتایج دقیق تری به دست می آید ولی در این مقاله، به دلیل این که پولک ها در فاصله های دور از چشمه، به اندازه کافی فعال نمی شدند و باعث ایجاد خطا در نتایج می شد از آشکارساز نوترونی  $\text{BF}_3$  استفاده گردید و تصحیحات لازم با استفاده از پولک دیسپرسیوم در فواصل نزدیک چشمه انجام گرفت. یعنی در حقیقت شمارش حاصل از آشکارساز  $\text{BF}_3$  به پولک تعمیم داده شد. به این ترتیب خطا در اندازه گیری شار مطلق نوترون، تنها خطای ممکن در انجام این آزمایش است و از آن جایی که خطا در تعیین شار مطلق نوترون با پولک طلا کمتر از ۱۰ درصد است و با محاسبه شدت چشمه با آشکارساز  $\text{BF}_3$ ، مقدار خطا برابر با ۱۰/۲۹٪ به دست می آید که نتیجه قابل قبولی می باشد. می توان گفت خطای این آزمایش، کلاً بیش از ۱۱ درصد نمی باشد. همچنین چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ ، آشکارساز

#### مراجع

- [1] D. Turkoglu. Characterization of a new external neutron beam facility at the Ohio State University. *Journal Radioanal Nucl Chem.*, 291, 321–327, 2012.
- [2] G. F. Knoll. Radiation detection and measurement, 3rd Edition. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] G. Shani. Radiation dosimetry Instrumentation and Methods. 2nd Edition, CRC Press, 2000.
- [4] H. Jafari and S. A. H. Feghhi. Design and simulation of neutron radiography system based on  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  source. *Radiation Physics and Chemistry*, 81, 506–511, 2012.
- [5] T. Michikaw, T. Sanami, M. Hagiwara, H. Kadotani. Absolute Calibration of Radioactive Neutron Source Strength by Geometrical Integration of Thermal Neutrons in Graphite Pile, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47, 3635–3637, 2008.
- [6] J. Planchard. On the calculation of flux in slightly sub-critical reactors with external neutron sources. *Progress in nuclear energy*, 23, 181–189, 1990.
- [7] E. D. Blakeman. Summary Description of the  $^{252}\text{Cf}$ -Source-Driven Noise Analysis Method for Measurement of Sub-criticality. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 2008.
- [8] S. Croft. The use of neutron intensity calibrated Be ( $\alpha, n$ ) sources as 4438 keV gamma-ray reference standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, SPECTrometers, Detectors and Associated Equipment.*, 281, 103-116, 1989.
- [9] D. B. Pelowitz. MCNPX User's Manual Version-2.7 Los Alamos National Laboratory, USA, 2011.
- [10] J. R. Lamarsh. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Addison -Wesley Publishing Company, 1966.
- [11] W. G. Alberts, M. Matzke, W. Sosaat. Determination of the source strength of Cf-252 neutron sources using the water-bath method. *PTB Mitteilungen Journal.*, 98, 395–398, 1988.
- [12] W. G. Alberts, M. Matzke. Time behavior of the source strength of a californium 252 neutron source. *PTB Mitteilungen Journal.*, 93, 315–317, 1983.

- [13] R. M. Villafaña, J. M. Los Arcos, E. Gallego, A. Lorente. Determination of the emission rate of an Am-Be neutron source with a Bonner sphere SPECTrometer. *Radiation Measurements.*, 45, 1271-1275, 2010.
- [14] S. Croft, D. Henzlova. Determining  $^{252}\text{Cf}$  source strength by absolute passive neutron correlation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, 714, 5-12, 2013.
- [15] E. Mensimah, R.G. Abrefah, B.J.B. Nyarko, J.J. Fletcher, M. Asamoah. Neutron flux determination in irradiation sites of an Am-Be neutron source at NNRI. *Annals of Nuclear Energy.*, 38, 2303 – 2308, 2011.
- [16] D. Ilberg, Y. Segal. On the Measurement of the thermal neutron flux with foils. *Nuclear Instruments and Methods.*, 61, 93-98, 1968.
- [17] A. F. Valente. A Manual Experiments In Reactor Physics. The Macmillan company, New York, 1963.
- [18] J. H. Mathews, K. D. Fink. Numerical Methods Using Matlab. Fourth Edition, Prentice-Hall Pub. Inc, 2004.
- [19] ENDF-6 Formats Manual. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory, 2005.
- [20] R. E. MacFarlane, D. W. Muir. The NJOY Nuclear Data Processing System Version91. Los Alamos National Laboratory, 1994.
- [21] D. Novković, L. Nadder, A. Kandić, I. Vukanac, M. Durašević, D. Jordanov. Testing the exponential decay law of gold  $^{198}\text{Au}$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.*, 566, 477-480, 2006.



## Determination the Strength of a $^{241}\text{Am-Be}$ Neutron Source

Akbar Abdi Saray<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Esteki<sup>2\*</sup>, Jamshid Khorsandi<sup>3</sup>

1. Phd. Student, Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advance Sciences and Technologies, University of Isfahan, Isfahan-Iran
2. Associate Professor, Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advance Sciences and Technologies, University of Isfahan, Isfahan-Iran
3. Associate Professor, Reactor Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Isfahan, Iran

\* Corresponding author's Email: [m.esteki@eng.ui.ac.ir](mailto:m.esteki@eng.ui.ac.ir)

(Received: 2016/02/18- Accepted: 2016/04/29)

### ABSTRACT

Neutrons are used for medical, shielding and material research. The neutron has a greater linear energy transfer, and is considered a perilous radiation in comparison with gamma-rays. In recent years the use of ( $\alpha$ , n) neutron sources are increased because of their high neutron yield.  $^{241}\text{Am-Be}$  is one of them that is widely used in many research centers and universities as a calibration source of neutron radiation. To calculate dose rates of Gamma and neutron from  $^{241}\text{Am-Be}$  source, measure its intensity, is one of the essential and important tasks. Strength of a  $^{241}\text{Am-Be}$  Neutron Source determined by the  $\text{BF}_3$  detector with the spatial integration method and error of the experiment, with applied corrections by Dysprosium and Gold foils has been reduced to less than 10.30%. Also, the  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source,  $\text{BF}_3$  detector and water tank were simulated with a Monte Carlo method and there is a good agreement between simulation and experimental results.

**Keywords:** Neutron Activation, Neutron Source, Monte Carlo Method, Gold Foil, NaI Detector