

## طراحی ضخامت بهینه برای کند کننده ی آب در تحلیل گامای آنی حاصل از فعالسازی

### نوترونی (PGNAA) با استفاده از کد محاسباتی MCNPX و نتایج تجربی

لیلا علیزاده تازه آباد<sup>۱\*</sup>؛ احمد شیرانی<sup>۱</sup>؛ مجید جلالی<sup>۲</sup>؛ جمشید خورسندی<sup>۲</sup>؛ حمیده کنعانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده فیزیک

<sup>۲</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده تحقیقات و توسعه راکتور ها و شناخت‌دهنده ها (اصفهان)

### چکیده

پرتودهی مواد با نوترون و آشکارسازی اشعه‌ی گامای آنی  $(MeV - 11)$ ، پایه و اساس تحلیل گامای آنی حاصل از فعالسازی نوترونی (PGNAA) است. در این تحقیق، یک سیستم PGNAA برای شناسایی عنصر نیتروژن موجود در نمونه طراحی شد. به علت سطح مقطع بالایی بر هم کنش نوترون‌های حرارتی با عناصر، یک کندکننده از جنس آب برای نمونه در نظر گرفته شده است. با استفاده از کد محاسباتی MCNPX، شبیه‌سازی برای هندسه و ضخامت‌های مختلف آب انجام شد تا بیشینه شار نوترون حرارتی در محل نمونه حاصل شود. هندسه و ضخامت بهینه‌ی کندکننده حاصل شده از کد، به طور تجربی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیری شار نوترون و شار اشعه‌ی گامای حاصل از محاسبات و تجربه با یکدیگر مقایسه گردید و با تحلیل نتایج حاصل شده، ضخامت بهینه‌ی کندکننده‌ی تعیین گردید. کلید واژه: PGNAA، گامای آنی، کندکننده

### مقدمه

تحلیل گامای آنی حاصل از فعالسازی نوترونی (PGNAA)، یک روش هسته‌ای پایدار است که کاربردهای مهمی در زمینه‌ی شناسایی مواد منفجره پنهان شده، شناسایی عناصر موجود در بدن، شناسایی دهانه ورودی های نفت و ... دارد. این روش مبتنی بر آشکارسازی اشعه‌ی گامای گسیل شده به صورت آنی توسط ماده هدف است که مورد تابش نوترون قرار گرفته است [۱-۲]. پس از جذب یک نوترون حرارتی توسط یک هسته هدف، در مدت زمانی از مرتبه  $10^{-12}$  S یک پرتوی گامای آنی، که خاص آن هسته است گسیل می‌شود که می‌تواند برای شناسایی آن عنصر مورد استفاده قرار بگیرد. قدرت نفوذ زیاد نوترون و گاما در ماده سبب می‌شود که روش PGNAA، برخلاف بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری دارای خصوصیات مهمی باشد، از جمله آنالیز مواد در نمونه حجیم، آنالیز فوری در محل، غیر مخرب بودن روش و عدم نیاز به آماده سازی قبلی نمونه. از سوی دیگر، با توجه به اینکه پرتوهای گامای آنی بلافاصله پس از جذب نوترون در هسته گسیل می‌شوند،

<sup>۱</sup> Prompt Gamma Neutron Activation Analysis

مشکل ناشی از نیمه عمرهای خیلی کوتاه و خیلی بلند مطرح نیست و همه‌ی عناصری که سطح مقطع جذب نوترون پایین نداشته و دارای پرتوهی گامای آنی با شدت مناسب باشند توسط این روش قابل شناسایی می‌باشند [۳]. در این تحقیق، از این روش برای شناسایی عنصر نیتروژن استفاده می‌شود که یکی از عناصر تشکیل دهنده‌ی مواد منفجره است. هسته‌ی نیتروژن پس از گیراندازی نوترون حرارتی، اشعه گامای آنی مشخصه با انرژی  $10.830 \text{ MeV}$  گسیل می‌کند.



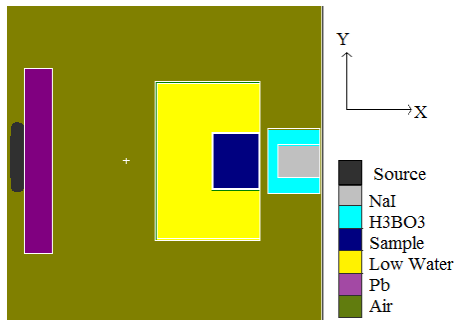
چون بهره‌ی واکنش  $(n,\gamma)$  برای نوترون‌های حرارتی خیلی بالا است، هدف طراحی یک کندکننده از جنس آب با ضخامت مناسب برای نمونه، به منظور بالا بردن بازده برهم کنش‌های نوترون با هسته هدف است، به طوری که شار نوترون حرارتی روی نمونه بیشینه شود و به دنبال آن شدت پرتوهای گامای حاصل از نمونه حاوی نیتروژن افزایش یابد. مطالعاتی در زمینه‌ی کشف مواد حاوی نیتروژن با حفاظ‌گذاری آشکارساز به منظور بالا بردن قدرت تفکیک و بازده آشکار ساز برای اشعه‌ی گامای نیتروژن  $10.830 \text{ MeV}$  انجام شده است [۴]. ابزار اساسی مورد نیاز برای PGNAA عبارتند از چشمه‌ی نوترون، سیستم مناسب برای آشکارسازی اشعه‌ی گاما و یک آگاهی از واکنش‌هایی که نوترون با هسته‌های هدف انجام می‌دهد. استفاده از آشکارساز  $\text{NaI(Tl)}$  یک روش متداول برای شناسایی اشعه‌ی گاما در تخمین نیتروژن موجود در مواد منفجره است. مهم‌ترین ویژگی‌های هر دستگاه PGNAA داشتن شار نوترون‌های حرارتی بیشینه در محل نمونه، بالا بردن فراوانی اشعه‌ی گامای آنی گسیل شده از عناصر و کم کردن اشعه‌ی گامای پس‌زمینه است. در این تحقیق از چشمه  $\text{Am-Be}$  و آشکارساز  $\text{NaI}$  استفاده شده است و پودر ملامین به عنوان یک نمونه حاوی نیتروژن مورد بررسی قرار گرفته است. حفاظ طراحی شده برای نمونه باید به گونه‌ای باشد که باعث بیشترین واکنش نوترون با هسته‌ی هدف شود. به این منظور ابتدا مدل مورد نظر توسط کد محاسباتی MCNPX شبیه‌سازی شد و پس از به دست آوردن ضخامت بهینه برای کندکننده، دستگاه اندازه‌گیری در شرایط بهینه، آماده‌سازی و اندازه‌گیری‌های لازم انجام شد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

## روش کار

از چشمه  $\text{Am-Be}$  با قدرت  $5 \text{ Ci}$  (کپسول  $X.14$ ) به عنوان چشمه نوترون استفاده شده است. فرایند تولید نوترون در این چشمه به صورت زیر است:



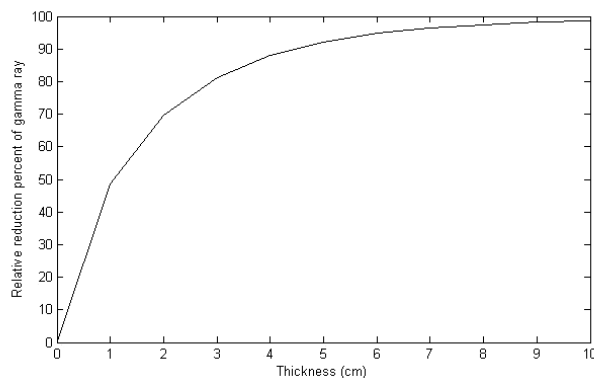
در این برهم کنش، کربن در حالت برانگیخته تشکیل می‌شود و در برگشت به حالت پایه اشعه‌ی گاما با انرژی  $4/43 \text{ MeV}$  گسیل می‌کند. این اشعه به هنگام خروج از چشمه به دلیل برهم کنش با غلاف فولادی احاطه کننده‌ی چشمه، به یک طیف اشعه‌ی گاما تبدیل می‌شود. به منظور جذب این طیف گامای خارج شده از چشمه، باید یک حفاظ سربی مناسب در نظر گرفته شود. ضخامت بهینه سرب توسط کد شبیه‌سازی MCNPX طراحی شد. سرب با ابعاد  $(X \times 10 \times 20) \text{ cm}^3$  به عنوان حفاظ اشعه‌ی گامای چشمه در نظر گرفته شد که  $X$  ضخامت سرب است که از  $1 \text{ cm}$  تا  $10 \text{ cm}$  شبیه‌سازی شد و ضخامت بهینه که در آن بیشینه کاهش کل شار گامای خارج شده از سرب را موجب می‌شود، به دست آمد. در گام بعدی، طراحی کندکننده، نمونه و آشکارساز انجام شد. به دلیل دسترسی آسان و هزینه‌ی پایین، از آب مقطر به عنوان کندکننده استفاده شده است. برای دست یافتن به بیشینه شار نوترون حرارتی در نمونه، نمونه از پنج جهت با آب احاطه شد و وجه ششم آن مقابل آشکارساز NaI با ابعاد  $3 \times 3$  قرار گرفت که به فاصله  $2 \text{ cm}$  از آشکارساز قرار دارد. فاصله‌ی آشکارساز از چشمه  $48 \text{ cm}$  است. به منظور کاهش برهم کنش‌های نوترون با ماده آشکارساز و جلوگیری از تخریب آشکارساز یک حفاظ به ضخامت  $2 \text{ cm}$  اطراف حجم حساس آشکارساز قرار داده شد. این حفاظ از جنس اسید بوریک ( $\text{H}_2\text{BO}_3$ ) است زیرا که بور سطح مقطع جذب نوترون حرارتی بسیاری بالایی در حدود  $3840 \text{ barn}$  دارد. نمونه‌ی مورد بررسی یک ماده حاوی نیتروژن است. در این کار از پودر ملامین با فرمول شیمیایی  $\text{C}_7\text{H}_7\text{N}_7$  و با چگالی  $0/75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$  به عنوان نمونه استفاده شد. ابعاد نمونه  $(10 \times 10 \times 20) \text{ cm}^3$  است. نمونه و آب در ظرف‌های مکعبی شکل، از جنس پلی‌اتیلن قرار دارند که ضخامت این ظرف‌ها  $3 \text{ mm}$  است. شبیه سازی هندسه‌ی توصیف شده برای ضخامت‌های  $3 \text{ cm}$ ،  $6 \text{ cm}$ ،  $9 \text{ cm}$  و  $12 \text{ cm}$  آب انجام شد و طیف گامای آشکارساز و شار نوترون در نقاط مختلف نمونه اندازه گیری شد. سپس همین هندسه برای ضخامت‌های  $3 \text{ cm}$  و  $6 \text{ cm}$  که به شرایط بهینه نزدیکتر هستند مورد آزمایش قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری نوترون حرارتی از آشکارساز  $\text{BF}_3$  استفاده شد و برای اندازه‌گیری اشعه‌ی گاما از آشکارساز NaI با ابعاد  $3 \times 3$  مدل ORTEC استفاده شد. شار نوترون حرارتی در ابتدا، داخل و انتهای نمونه و نیز شار اشعه‌ی گامای ذخیره شده در آشکارساز محاسبه شد و شار نوترون حرارتی در انتهای نمونه و شار اشعه‌ی گامای ذخیره شده در آشکارساز اندازه‌گیری شد و با بررسی شار نوترون حرارتی و طیف اشعه‌ی گامای نتایج تجربی و شبیه‌سازی، بهینه ضخامت کندکننده برای نمونه به دست آمد. سیستم PGNAA استفاده شده در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۲): یک سطح مقطع از هندسه‌ی سیستم

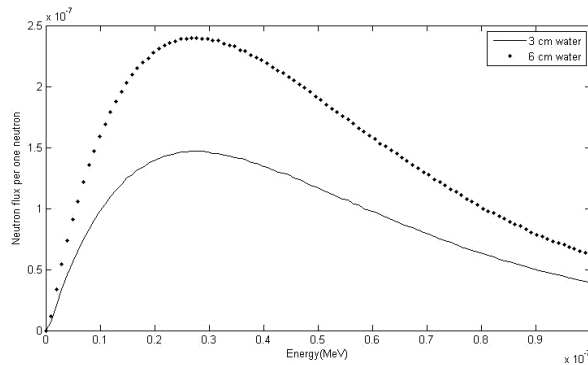
## نتایج

ابتدا ضخامت بهینه‌ی سرب برای چشمه محاسبه شد. شکل زیر میزان کاهش کل شار اشعه‌ی گاما به ازای عبور از ضخامت‌های مختلف سرب را، نشان می‌دهد.



شکل (۲): میزان کاهش کل اشعه‌ی گاما به ازای ضخامت‌های مختلف سرب

همان طور که مشاهده می‌شود، ضخامت بهینه‌ی سرب، ۵ cm است که در آن کاهش کل شار گاما به ۹۰ درصد می‌رسد. سپس به فاصله ۴۱ cm آشکارساز قرار گرفت و ما بین آشکارساز و حفاظ سربی چشمه، نمونه که از ۵ جهت توسط کندکننده احاطه شده قرار داده شد. شار نوترون حرارتی در داخل نمونه، برای ضخامت ۳ cm و ۶ cm کندکننده محاسبه شد و نتیجه زیر به دست آمد.



شکل (۲): شار نوترون‌های در بازه‌ی حرارتی در داخل نمونه برای ضخامت ۳ cm و ۶ cm کندکننده‌ی آب

شار نوترون حرارتی در داخل نمونه برای ۶ cm ضخامت آب از اطراف نمونه، بهینه است. شار نوترون حرارتی رسیده به انتهای نمونه نیز برای دو حالت محاسبه شد. همچنین این مقدار به کمک آشکارساز  $BF_3$  اندازه‌گیری شد و نتایج زیر به دست آمد.

جدول (۱): شار نوترون حرارتی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در انتهای نمونه

	(نسبت کل نوترون‌ها حرارتی برای ضخامت ۶ cm آب به ضخامت ۳ cm آب)
اندازه‌گیری شده	۱/۴۷
محاسبه شده	۱/۴

همان‌طور که مشاهده می‌شود توافق خوبی بین محاسبه و اندازه‌گیری وجود دارد. سپس سطح زیر قله‌ی نیتروژن در طیف اشعه‌ی گاما برای دو حالت محاسبه و اندازه‌گیری شد و نتایج زیر به دست آمد. سطح زیر قله‌ی نیتروژن شامل قله‌ی تمام انرژی (۱۰/۸۳ MeV) و قله تک فراری (۱۰/۳۱۹ MeV) و قله‌ی دو فراری (MeV) ۹/۸۰۸ است.

جدول (۲): سطح زیر قله‌ی اشعه‌ی گامای نیتروژن

	(نسبت کل سطح زیر قله‌ی نیتروژن در طیف اشعه‌ی گاما برای ضخامت ۶ cm آب به ضخامت ۳ cm آب)
اندازه‌گیری شده	۰/۷۳
محاسبه شده	۱/۰۴

مشاهده می‌شود که در آزمایش، ضخامت بهینه‌ی آب، برای بیشینه شار گاما متناسب با بیشینه شار نوترون حرارتی نیست و در شبیه‌سازی نیز نسبت گاما برای دو حالت نزدیک به ۱ است. دلیلی که می‌توان برای این تفاوت ذکر کرد این است که علاوه بر شار نوترون حرارتی در داخل نمونه، میزان نوترون‌های فوق حرارتی، میانه و سریع در ابتدای نمونه با اهمیت هستند، زیرا که خود نمونه دارای عناصر هیدروژن و کربن است و در کند کردن نوترون نقش دارد. میانگین شار نوترون‌های فوق حرارتی، میانه و سریع محاسبه شده در ابتدای نمونه در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول (۳): میانگین شار نوترون‌های فوق حرارتی، میانه و سریع در ابتدای نمونه

مجموع	میانگین نوترون‌های سریع به ازای یک نوترون	میانگین نوترون‌های میانه به ازای یک نوترون	میانگین نوترون‌های فوق حرارتی به ازای یک نوترون
$6/35 \times 10^{-8}$	$3/87 \times 10^{-8}$	$1/43 \times 10^{-8}$	$1/05 \times 10^{-8}$
$5/42 \times 10^{-8}$	$2/91 \times 10^{-8}$	$1/19 \times 10^{-8}$	$1/32 \times 10^{-8}$

همان طور که مشاهده می‌شود مجموع نوترون‌های فوق حرارتی، میانه و سریع برای ضخامت ۳ cm کندکننده آب بیشتر است. بنابراین برهم کنش نوترون حرارتی با نیتروژن در ضخامت ۳ cm آب بیشینه است.

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج فوق می‌توان دریافت که میزان ضخامت بهینه برای کندکننده آب، ۳ cm از اطراف نمونه است.

[۱] A. A. Naghavi, M. S. Abdelmonem, "New source-Moderator geometry to improve performance of  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am-Be}$  source-based Pased PGNAA Setup", Nuclear instruments and Methods in Physics Research A, ۵۶۲, ۳۵۸-۳۶۴, ۲۰۰۶

[۲] H. Panjeh and H. M. Hakimabad; "Improving The Performance of  $^{241}\text{Am-Be}$  For PGNAA Application Using A Proper Shielding For Neutron source and The NaI detector", Nuclear Technology and Radiation Protection"; Vol ۲۵, No ۳, pp ۲۰۵-۲۱۱, ۲۰۱۰.

[۳] میری حکیم‌آبادی، هاشم؛ کوهی فایق، رحیم؛ هادی زاده، هادی؛ «کاربرد روش فعالسازی نوترونی در کشف مواد منفجره»؛ مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲، شماره ۳، تابستان ۱۳۷۹، صفحه ۱۵۱ تا ۱۶۱.

[۴] H. Paneh., H. M. Hakimabadi, L. R. Motavalli, "Improving the performance of Am-Be for PGNAA Application Using a proper shielding for neutron source and the NaI detector", Nuclear Technology & Radiation Protection Vol. ۲۵, No. ۳, pp. ۲۰۵-۲۱۱, ۲۰۱۰.