



# بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## اندازه‌گیری سطح پرتوزایی هسته‌های گاما در بشکه‌های پسمان نیروگاه اتمی بوشهر

مجتبی دارا<sup>۱</sup>، محمد صمدفام<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا آقاییگی<sup>۲</sup>، حسن رستمی<sup>۲</sup>، زهرا صابونی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

<sup>۲</sup>شرکت بهره‌برداری نیروگاه اتمی بوشهر

<sup>۳</sup>شرکت مادر تخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران

### چکیده:

در این تحقیق، برنامه‌ای کامپیوتری جهت اندازه‌گیری سطح پرتوزایی هسته‌های گاما در بشکه‌های پسمان نیروگاه اتمی بوشهر با روش اندازه‌گیری اسکن برشی گاما (SGSGamma Scanning; Segmented) نوشته شد. در ادامه با روش آشکارسازی به دست آمده از طریق شبیه‌سازی سیستم گاما اسکنر در کد MCNP و برنامه نوشته شده، با هم‌دیگر مقایسه گردید. در بخش اندازه‌گیری‌های تجربی، سطح پرتوزایی هسته‌های  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  موجود در بشکه‌های پسمان واقعی نیروگاه توسط نمونه سیستم گاما اسکنر توسعه داده شده، سیستم گاما اسکنر بوشهر و سیستم گاما اسکنر اورنک محاسبه شد و نتایج با هم‌دیگر مقایسه گردید. نتایج به دست آمده با نمونه سیستم گاما اسکنر توسعه داده شده در این پروژه با گاما اسکنر نیروگاه بوشهر انطباق بسیار خوبی دارد به طوری که در مورد  $^{137}\text{Cs}$  اختلاف نتایج کمتر از ۱٪ و برای  $^{60}\text{Co}$  کمتر از ۱۴٪ می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** بشکه پسمان، پسمان هسته‌ای، اسکن برشی گاما (SGS)، محاسبه سطح پرتوزایی

### مقدمه

مطابق با مقررات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و نیز الزامات تعیین شده توسط نظام ایمنی هسته‌ای هر کشور، خصوصیات بشکه‌های پسمان و ترکیب هسته‌های پرتوزای اصلی موجود به همراه سطح پرتوزایی آنها باید قبل از حمل پسمان به خارج سایت، برای ذخیره‌سازی موقت یا دفن نهائی، مشخص شوند [۱]. سطح پرتوزایی برخی از هسته‌های گاما مانند  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  که به هسته‌های کلیدی معروفند با روش ساده و غیر مخرب طیف‌سنجی گاما از بیرون بسته‌های پسمان قابل اندازه‌گیری است. رایج‌ترین روش اندازه‌گیری سطح پرتوزایی هسته‌های کلیدی، روش اسکن برشی گاما (SGS) می‌باشد. این روش شامل یک یا چند اسکن در راستای محور بشکه است، به طوری که بشکه در مدت زمان اندازه‌گیری به صورت پیوسته می‌چرخد و تابش‌های گسیلی از بشکه در آشکارساز موازی شده ثبت می‌شود و در نهایت نتیجه حاصل به سطح پرتوزایی کل بشکه تعمیم داده می‌شود [۲].



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

محاسبه‌ی سطح پرتوزایی هسته‌های پرتوزا مستلزم کالیبراسیون بازدهی سیستم آشکارسازی است و معمولاً با استفاده از بسته‌های استاندارد مرجع یا محاسبات تحلیلی انجام می‌شود. روش‌های تحلیلی کنونی برای محاسبه بازدهی آشکارسازی بسته‌های پسمان از دو فرض توزیع یکنواخت فعالیت چشمه و توزیع یکنواخت ماتریس بسته پسمان استفاده می‌کنند [۳]. اما از آنجا که بسته‌های پسمان واقعی دارای توزیع غیریکنواخت چگالی و فعالیت می‌باشند این وضعیت به ندرت رخ خواهد داد. به منظور غلبه بر خطاهای ناشی از غیریکنواختی عمودی ماتریس بشکه و توزیع فعالیت، روش طیف نگاری برشی گاما (SGS) از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. ایده اساسی در این روش تقسیم بشکه به یک سری بخش‌های افقی و ارزیابی هر بخش می‌باشد. نتایج دقیق در SGS با استفاده از فرضیه‌های توزیع یکنواخت ماتریس و فعالیت برای هر بخش حاصل می‌شود [۴].

### روش کار

این تحقیق از سه قسمت مدل‌سازی کامپیوتری و برنامه‌نویسی، شبیه‌سازی MCNP و اندازه‌گیری‌های تجربی تشکیل شده است.

### مدل‌سازی کامپیوتری و برنامه نویسی

#### ۱- هندسه سیستم گاما اسکنر

حالت اسکن مدل شده بدین صورت است که آشکارساز در فاصله‌ی ثابتی از سطح بشکه قرار گرفته است و پرتوهای گسیلی از بشکه در سه ارتفاع مختلف از بشکه توسط آشکارساز ثبت می‌شود. در هر فاصله‌ای از سطح بشکه و در هر ارتفاع که اندازه‌گیری انجام می‌گیرد، زاویه‌ی دید آشکارسازها توسط موازی‌ساز به گونه‌ای محدود شده است که هر یک از آشکارسازها تنها یک سوم از ارتفاع بشکه را مشاهده می‌کنند.

#### ۲- محاسبه بازدهی آشکارسازی کل

با تقسیم ماتریس پسمان مدل شده به سلول‌های مکعبی شکل با حجم و سطح پرتوزایی برابر (با فرض توزیع یکنواخت فعالیت و چگالی ماتریس پسمان)، بازدهی هر سلول با استفاده از تئوری "بازسازی سطح پرتوزایی چشمه‌های نقطه‌ای موجود در بشکه‌ی پسمان" ارائه شده توسط مایرهورفر و کرینگز [۵] محاسبه می‌شود. اگر تعداد کل سلول‌ها برابر با  $N$  باشد، سطح پرتوزایی هر سلول برابر با  $A_i = A/N$  و نرخ شمارش آشکارساز برابر با  $T_i$  خواهد بود و بازدهی آشکارسازی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_i = \frac{T_i}{A_i} = \varepsilon(d_0) \cdot K(d_n) \cdot I_\gamma \cdot e^{-(\mu_p/\rho_p)\rho_p \cdot l_p} \cdot e^{-(\mu_w/\rho_w)\rho_w \cdot l_w} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱،  $\varepsilon(d_0)$  بازدهی آشکارساز برای چشمه‌ی نقطه‌ای استاندارد واقع در محل تقاطع محور آشکارساز با محور بشکه  $(d_0)$ ،  $K(d_n)$  تابع پاسخ موازی‌ساز،  $I_\gamma$  احتمال گسیل تابش با انرژی  $E_\gamma$ ، **A Error!**



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

**Bookmark not defined.** فعالیت چشمه‌ی نقطه‌ای و دو ترم آخر بیانگر تضعیف پرتو در ماتریس پسمان و دیواره بشکه می‌باشند.

بازدهی آشکارسازی کل سیستم طبق تعریف برابر است با:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{T_{tot}}{A_{tot}} = \frac{\sum T_i}{\sum A_i} = \frac{A_i \sum \varepsilon_i}{NA_i} = \frac{\sum \varepsilon_i}{N} \quad (2)$$

به عبارتی بازدهی کل بشکه برابر با میانگین بازدهی سلول‌های ماتریس خواهد بود.

### ۳- محاسبه سطح پرتوزایی کل

با وجود موازی‌ساز، تنها سطح پرتوزایی بخشی از ماتریس پسمان (حجم قابل مشاهده توسط آشکارساز) برآورد شده و به عنوان سطح پرتوزایی کل ماتریس گزارش می‌شود. سطح پرتوزایی کل بشکه با ترکیب نتایج حاصل از سه آشکارساز، از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در رابطه‌ی ۳،  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  به ترتیب سطح پرتوزایی محاسبه شده توسط آشکارسازهای ۱، ۲ و ۳،  $V$  حجم کل ماتریس پسمان،  $V_1$  حجم پوشش داده شده توسط آشکارساز ۱،  $V_{12}$  حجم تداخلی پوشش داده شده توسط آشکارسازهای ۱ و ۲،  $V_{123}$  حجم تداخلی پوشش داده شده توسط سه آشکارساز می‌باشد.

$$A = A_1 \frac{V_1}{V} + A_2 \frac{V_2}{V} + A_3 \frac{V_3}{V} + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \frac{V_{12}}{V} + \left( \frac{A_2 + A_3}{2} \right) \frac{V_{23}}{V} + \left( \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \right) \frac{V_{123}}{V} \quad (3)$$

### شبیه‌سازی سیستم گاما اسکنر با کد محاسبات هسته‌ای MCNP

هندسه‌ی سیستم گاما اسکنر از دو بخش بشکه پسمان و آشکارساز موازی شده تشکیل می‌شود. بشکه از جنس استیل و دارای قطر داخلی  $564 \text{ mm}$ ، ضخامت  $3 \text{ mm}$ ، ارتفاع  $864 \text{ mm}$  و وزن  $89 \text{ kg}$  می‌باشد. آشکارساز شبیه‌سازی شده از نوع GEM, P Type، با شعاع بلور  $25/4 \text{ mm}$ ، ارتفاع  $41/2 \text{ mm}$  و ضخامت پنجره آلومینیومی  $2/45 \text{ mm}$  می‌باشد. شعاع خارجی آشکارساز برابر با  $34 \text{ mm}$  و برابر با شعاع داخلی موازی‌ساز است. جهت محاسبه نرخ شمارش از تالی F8 در حجم فعال آشکارساز برای ثبت پرتوهای گسیلی از  $^{137}\text{Cs}$  (انرژی  $661/66 \text{ keV}$ ) و  $^{60}\text{Co}$  (انرژی‌های  $1174 \text{ keV}$  و  $1332 \text{ keV}$ ) استفاده شد.

### اندازه‌گیری‌های تجربی

تجهیزات به کار گرفته شده در نمونه آزمایشگاهی سیستم گاما اسکنر جهت اندازه‌گیری‌های تجربی عبارتند از: آشکارساز HPGe، پایه نگهدارنده آشکارساز، صفحه چرخان و موازی‌ساز. آشکارساز از نوع GEM, P Type با



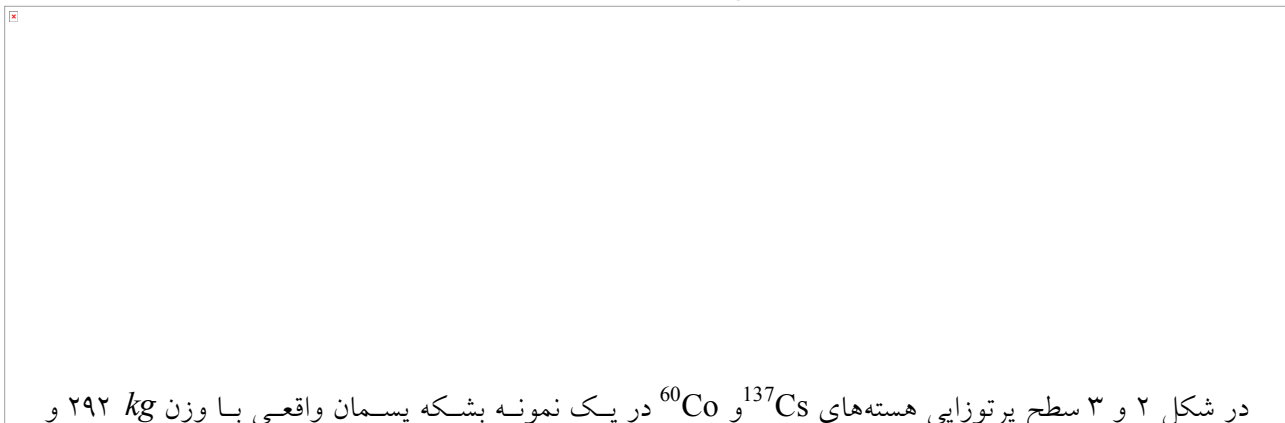
# بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

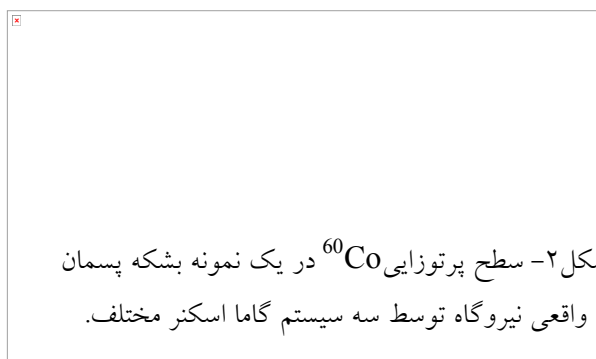
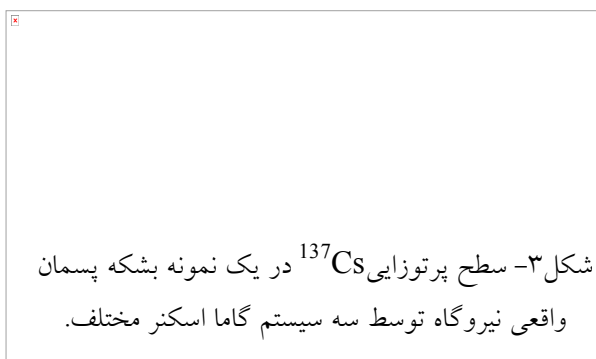
بازدهی ۳۵٪، شعاع بلور  $31/9 \text{ mm}$ ، ارتفاع  $50/4 \text{ mm}$  و ضخامت پنجره آلومینیومی  $1/0 \text{ mm}$  می باشد. موازی سازها دارای ارتفاع  $5 \text{ cm}$ ، ضخامت  $25/4 \text{ mm}$  و قطر داخلی  $110/8 \text{ mm}$  هستند. جهت اعتبارسنجی برنامه، یک بشکه پسمان واقعی نیروگاه بوشهر انتخاب و سطح پرتوزایی آن توسط (۱) نمونه آزمایشگاهی گاما اسکنر توسعه داده شده، (۲) گاما اسکنر نیروگاه بوشهر و (۳) گاما اسکنر اورتک (نرم افزار ارزیابی بسته های پسمان Isotopic-32 متعلق به شرکت اورتک) اندازه گیری شد.

## نتایج

در شکل ۱ منحنی های بازدهی آشکارسازی کل حاصل از برنامه نوشته شده و شبیه سازی برای انرژی های گسیلی  $^{60}\text{Co}$  و  $^{137}\text{Cs}$  بر حسب فاصله آشکارساز از سطح بشکه پسمان رسم شده است. این نمودارها مربوط به قرارگیری آشکارساز در موقعیت میانی بوده و تغییرات بازدهی آشکارسازی کل برای موقعیت های مختلف دیگر دارای رفتاری مشابه با نمودارهای شکل ۱ می باشد. خاطر نشان می گردد با تغییر فاصله آشکارساز از سطح بشکه، طول موازی ساز به گونه ای تغییر می کند که همواره یک سوم از ارتفاع بشکه توسط آشکارساز مشاهده گردد.



در شکل ۲ و ۳ سطح پرتوزایی هسته های  $^{60}\text{Co}$  و  $^{137}\text{Cs}$  در یک نمونه بشکه پسمان واقعی با وزن  $292 \text{ kg}$  و شکل ۱- نمودار بازدهی آشکارسازی کل گاما های گسیلی از  $^{60}\text{Co}$  و  $^{137}\text{Cs}$  بر حسب فاصله آشکارساز از سطح بشکه توسط آشکارساز میانی.





# بیست و یکمین کنفرانس هفتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بحث و نتیجه گیری

مطابق با شکل ۱ با افزایش فاصله از سطح بشکه نتایج بازدهی حاصل از شبیه سازی با برنامه نوشته شده به خوبی بر هم منطبق شده اند اما در فواصل نزدیک اختلافی بین این دو مقدار وجود دارد. علت این اختلاف، عدم لحاظ فاکتور تصحیح میانگین طول مسیر پیموده شده توسط پرتو در حجم کریستال می باشد که در تابع پاسخ کلیماتور (تئوری مایهوفر و کرینگز [۵]) لحاظ نشده است.

در مورد اندازه گیری های تجربی همان طور که در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی گاما اسکنر توسعه داده شده با گاما اسکنر نیروگاه بوشهر انطباق بسیار خوبی دارد به طوری که در مورد  $^{137}\text{Cs}$  اختلاف نتایج کمتر از ۱٪ و برای  $^{60}\text{Co}$  کمتر از ۱۴٪ می باشد. نزدیکی اندازه گیری بین این دو سیستم متفاوت به دلیل اینکه هر دو سیستم، سطح پرتوزایی کل بشکه را با اندازه گیری در سه ارتفاع مختلف و تلفیق نتایج این سه اندازه گیری (با الگوریتم منحصربه فرد هر دستگاه) محاسبه می کنند خیلی دور از انتظار نیست. البته با توجه به اینکه بشکه ی پسمان اندازه گیری شده استاندارد نبود، نمی توان قضاوتی در خصوص دقیق تر بودن یکی از این دو اندازه گیری نسبت به دیگری انجام داد. انطباق خوب بین این دو اندازه گیری همچنین نشانگر قابل اعتماد بودن نرم افزار نوشته شده در این پروژه می باشد.

در مورد نتایج اندازه گیری با سیستم گاما اسکنر اورتک (نرم افزار Isotopic-32)، اختلاف بین سطح پرتوزایی کل اندازه گیری شده در ارتفاع های مختلف، اختلاف نسبتاً بالایی (تا ۶۰ درصد) را نشان می دهد. این اختلاف بالا نشان دهنده ی این است که فرض "توزیع فعالیت/توزیع چگالی ماتریسیک نوخت در داخل بشکه ی پسمانو یا هر دو" در مورد بشکه های واقعی پسمان فرض درستی نیست. در نهایت خاطر نشان می نماید میانگین سه اندازه گیری مختلف با سیستم اورتک که در شکل ۲ نشان داده شده است چندان معنی دار نیست به دلیل آنکه حجم پسمانی که در زاویه دید آشکارساز قرار می گیرد در ارتفاع های مختلف متفاوت می باشد.

## مراجع

1. R International Atomic Energy Agency, "Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization", TECDOC-1537, IAEA, Vienna, 2007.
2. A. Cesana, M. Terrani and G. Sandrelli, "Gamma activity determination in waste drums from nuclear plants," Applied Radiation and Isotopes, vol. 44, no. 3, pp. 517-520, 1993.
3. D. Gurau and O. Sima, "Simulation studies of the response function of a radioactive waste assay system," Applied Radiation and Isotopes, vol. 70, no. 1, pp. 305-308, 2012.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

4. Q. D. Tran, "Some theoretical results of gamma techniques for measuring large samples," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 416, pp. 505-515, 1998.
5. T. Krings and . E. Mauerhofer, "Reconstruction of the activity of point sources for the accurate characterization of nuclear waste drums by segmented gamma scanning," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, no. 6, pp. 880-889, 2011.