



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## طراحی یک الگوی بهینه برای چگالی سنجی سیالات به کمک پرتوهای گاما

رحیم خباز، فرهاد یعقوبی

دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

### چکیده:

اندازه‌گیری چگالی مواد به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روش غیرمخرب مستلزم این است که شامل یک تکنیک اندازه‌گیری توانا با پوشش محدوده‌ای وسیع از چگالی‌ها و آسان برای انجام باشد. چگالی سنجی با پرتو گاما یک تست غیرمخرب به خصوص در مورد مایعات می‌باشد که توسط دو اصل عبوری و پراکندگی انجام می‌شود. در کار حاضر کد مونت‌کارلو MCNP برای شبیه‌سازی از پیکربندی‌های مختلف از ابزارهای سنجش چگالی بر اساس اصول مذکور استفاده شد، تا برای دو محلول متفاوت سامانه بهینه تعیین گردد.

**کلید واژه:** پرتوگاما، شبیه‌سازی، کدمونت کارلو MCNP، آشکارساز، ضریب تضعیف جرمی

### مقدمه

اندازه‌گیری چگالی در صنایع مختلف کاربردهای زیادی دارد از جمله در صنایع شیمی، معدن‌کاری [۱]، سیمان و سرامیک و چوب و استیل [۲] و همچنین در صنعت نفت خام. روش‌های متفاوتی چون تکنیک‌های هیدرومتریک، هیدرواستاتیک، فراصوتی و هسته‌ای برای چگالی سنجی سیال وجود دارند. مزیت روش هسته‌ای به دیگر روش‌ها: سریع، معتبر و آسان بودن برای استفاده می‌باشد [۳]. یک چگالی سنج بر اساس روش هسته‌ای معمولاً سه مؤلفه دارد: چشمه پرتو، آشکارساز تابش، سیستم الکترونیک. که انتخاب چشمه تابش طبق معیارهایی چون: انرژی تابش، عمر مفید و طولانی و قابلیت استفاده صورت می‌گیرد [۴]. جذب تابش گاما، در اثر برهمکنش فوتون‌های پرتو گاما با الکترون‌ها، تحت دو اثر فوتوالکتریک (در انرژی‌های پائین) و پراکندگی کامپتون (در انرژی‌های بالا) صورت می‌گیرد. البته قابلیت هر ماده برای جذب تابش گاما به ترکیب شیمیایی آن بستگی دارد. در صورتی که ترکیب شیمیایی ماده مورد بررسی به خوبی شناخته شده نباشد در نتیجه ممکن است ضریب جذب محاسبه شده همراه با خطا باشد. در روش هسته‌ای فوتون‌های با شدت اولیه مشخص پس از تضعیف در اثر عبور از موانه‌ای مانند دیواره لوله حاوی سیال و سیال داخلی، در آشکارساز ثبت شده و پالس‌های الکترونیک تولید می‌کنند. آشکارساز می‌تواند شامل یک کریستال سوسوزن NaI و یک تکثیرکننده فوتون باشد. که با تعیین نسبت شدت شمارش پرتوهای گاما در حضور ماده مورد مطالعه به شمارش بدون ماده، می‌توان چگالی ماده را بدست آورد [۵].



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

### روش کار

دو تکنیک عبوری و پراکندگی در روش هسته‌ای، جهت اندازه‌گیری چگالی سیال وجود دارد. در روش عبوری، چشمه در یک طرف ماده مورد بررسی و آشکارساز در طرف دیگر قرار دارد. بدیهی است که پرتو گاما در اثر عبور از سیال و دیواره لوله محتوی آن، تضعیف می‌شود، لذا با توجه به معادله:

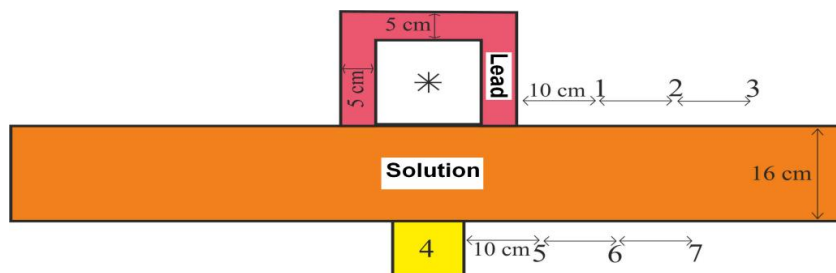
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \ln(I_0/I) = \mu_m \rho x \quad (1)$$

که  $I$ : شدت فوتون‌های بدون برخورد،  $I_0$ : شدت فوتون‌های اولیه،  $\mu$ : ضریب تضعیف خطی،  $\mu_m$ : ضریب تضعیف جرمی،  $\rho$ : چگالی،  $x$ : طول مسیر باریکه در جذب‌کننده می‌باشد [۶].  $\mu_m$  با توجه به نوع ماده و میزان انرژی پرتو گاما تعیین می‌شود. که پیدا کردن و محاسبه  $\mu_m$  برای چشمه‌های تک انرژی آسان است و جدول‌بندی مخصوص خود را دارند. ولی محاسبه  $\mu_m$  برای چشمه‌های گامای با دو انرژی به بالا کار مشکلی است و استفاده روش میانگین‌گیری با خطای نسبتاً زیادی همراه است. مثلاً برای آب با چگالی  $\rho_{H_2O} = 1 \text{ g/cm}^3$  که در برابر پرتوهای تک‌انرژی گاما ( $E = 1.05 \text{ MeV}$ ) قرار دارد، مقدار  $\mu_m$  محاسبه شده با استفاده از روش MCNP4C برابر  $\mu_m = 0.0574 \text{ cm}^2/\text{g}$  می‌باشد و مقدار  $\mu_m$  حاصل از جدول ضرایب تضعیف جرمی برای آب در همین انرژی  $\mu_m = 0.0575 \text{ cm}^2/\text{g}$  می‌باشد، که ملاحظه می‌شود تکنیک MCNP4C از دقت بسیار خوبی برخوردار است. لذا برای محاسبه مقدار  $\mu_m$  برای آب در مقابل پرتوهای گاما با بیش از یک انرژی (مانند چشمه  $^{22}\text{Na}$  که دارای دو پرتو با انرژی‌های  $0.511 \text{ MeV}$  (۹۹٫۹۴٪) و  $1.274 \text{ MeV}$  (۱۷٫۰٪) می‌باشد) با استفاده از همین روش MCNP4C،  $\mu_m = 0.105 \text{ cm}^2/\text{g}$  بدست می‌آید، ولی با استفاده از روش میانگین‌گیری،  $\bar{E} = 0.8 \text{ MeV}$  (انرژی میانگین) محاسبه می‌شود که با توجه به جدول ضرایب تضعیف جرمی در این انرژی  $\mu_m = 0.0856 \text{ cm}^2/\text{g}$  می‌باشد. در نتیجه برای محاسبه  $\mu_m$  مربوط به چشمه  $^{22}\text{Na}$  را باید از تکنیکی با کمک محاسبات مونت‌کارلو بدست آورد. در این مقاله برای تعیین رفتار دو روش عبوری و پراکندگی در تضعیف فوتون‌ها برحسب تغییر چگالی، توسط کد MCNP شبیه‌سازی شدند. برای شبیه‌سازی یک لوله PVC با ضخامت دیواره ۳mm و قطر ۱۶cm محتوی دو نوع محلول جداگانه  $\text{NaCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$  و  $\text{NH}_4\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$  ( $\rho_{\text{NH}_4\text{Cl}} = 1.03 \text{ g/cm}^3$  و  $\rho_{\text{NaCl}} = 2.16 \text{ g/cm}^3$ ) در نظر گرفته شد، و ارتفاع پالس آشکارساز قرار گرفته در هفت موقعیت متفاوت (در شکل-۱)، تعیین گردید.



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۱- یک طرح شماتیک از شبیه سازی اولیه برای موقعیت بهینه آشکارساز.

این در حالی است که در اطراف چشمه گاما جهت جلوگیری از پراکندگی، حفاظ سربی به ضخامت ۵cm تعبیه شد. هدف از این محاسبات یافتن سامانه ای بهینه برای هریک از پیکربندی های ماده- چشمه، برای داشتن بهترین قدرت تفکیک در تعیین چگالی می باشد.

### نتایج

میزان شمارش آشکارساز در هریک از موقعیت های شکل ۱ برای شش چگالی متفاوت محاسبه گردید. سپس شیب نمودار شمارش بر حسب چگالی، که می تواند معیاری مناسب برای قدرت تفکیک تعیین چگالی باشد، از برازش منحنی بدست آمد. در جدول های ۱ و ۲ بترتیب نتیجه محاسبات مربوط به چشمه های  $^{22}\text{Na}$  و  $^{137}\text{Cs}$  برای چگالی های مختلف محلول های  $\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$  و  $\text{NaCl.H}_2\text{O}$  آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود بیشترین مقدار شیب و کاهش شمارش نسبت به افزایش چگالی برای پرتوهای گامای چشمه های  $^{22}\text{Na}$  و  $^{137}\text{Cs}$  برای هر دو محلول، در موقعیت شماره ۴ آشکارساز می باشد.

جدول ۱- شیب نمودارهای مربوط به نسبت شمارش بر حسب چگالی برای  $\text{NaCl.H}_2\text{O}$  و  $\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$  در حضور چشمه  $^{22}\text{Na}$ .

شیب نمودار	مکان آشکارساز	شمارش در پایین ترین چگالی	شمارش در بالاترین چگالی	نوع ماده
$^{22}\text{Na}$ ۱۷۲-۲۱۰×۲	۱	$^{22}\text{Na}$ ۳۲۰-۱۰×۱	$^{22}\text{Na}$ ۳۲۵-۱۰×۱	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۶۸۰-۱۰×۵	۲	$^{22}\text{Na}$ ۳۵۶-۱۰×۶	$^{22}\text{Na}$ ۴۲۸-۱۰×۶	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۱۰۵-۱۰×۵	۳	$^{22}\text{Na}$ ۳۱۲-۱۰×۳	$^{22}\text{Na}$ ۴۱۹-۱۰×۳	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۱۶۰-۱۰×۳	۴	$^{22}\text{Na}$ ۸۰۳-۱۰×۶	$^{22}\text{Na}$ ۲۴۹-۱۰×۷	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۷۹۰-۱۰×۲	۵	$^{22}\text{Na}$ ۵۴۶-۱۰×۵	$^{22}\text{Na}$ ۹۱۷-۱۰×۵	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۶۲۰-۱۰×۲	۶	$^{22}\text{Na}$ ۲۲۲-۱۰×۳	$^{22}\text{Na}$ ۶۲۲-۱۰×۳	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۳۹۲-۱۰×۹	۷	$^{22}\text{Na}$ ۱۹۹-۱۰×۱	$^{22}\text{Na}$ ۳۳۰-۱۰×۱	$\text{NaCl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۱۴-۱۰×۵	۱	$^{22}\text{Na}$ ۳۱۸-۱۰×۱	$^{22}\text{Na}$ ۳۴۱-۱۰×۱	$\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۶۸۷-۱۰×۳	۲	$^{22}\text{Na}$ ۳۶۶-۱۰×۶	$^{22}\text{Na}$ ۵۱۰-۱۰×۶	$\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۲۵۶-۱۰×۲	۳	$^{22}\text{Na}$ ۳۱۴-۱۰×۳	$^{22}\text{Na}$ ۳۷۹-۱۰×۳	$\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۹۴۰-۱۰×۳	۴	$^{22}\text{Na}$ ۱۴۶-۱۰×۷	$^{22}\text{Na}$ ۳۱۰-۱۰×۷	$\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$
$^{22}\text{Na}$ ۵۱۰-۱۰×۳	۵	$^{22}\text{Na}$ ۸۴۱-۱۰×۵	$^{22}\text{Na}$ ۶۰۴-۱۰×۶	$\text{NH}_4\text{Cl.H}_2\text{O}$



# بیت ویکین کنفرانس هتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

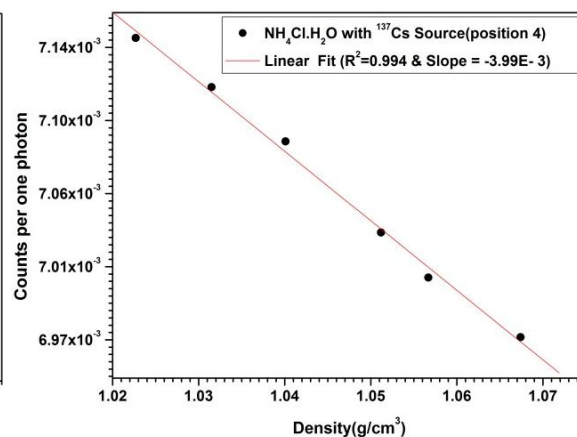
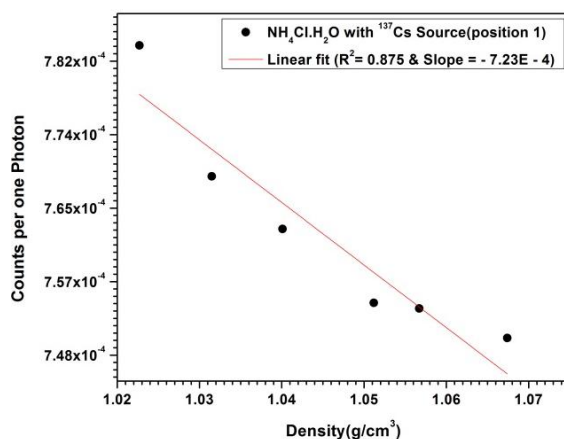
NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۶۳۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۵۳۸	۶	<sup>۳۱۰</sup> ×۲٫۵۷۰-
NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۳۸۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۳۴۹	۷	<sup>۳۱۰</sup> ×۹٫۴۴۷-

جدول ۲- شیب نمودارهای مربوط به نسبت شمارش بر حسب چگالی برای NH<sub>4</sub>Cl.H<sub>2</sub>O و NaCl.H<sub>2</sub>O در

حضور چشمه <sup>137</sup>Cs.

شیب نمودار	مکان آشکار ساز	شمارش در پایین ترین چگالی	شمارش در بالاترین چگالی	نوع ماده
<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۲۱۵-	۱	<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۵۹۰	<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۶۷۸	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۱۸۳-	۲	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۴۵۰	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۶۷۲	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۹٫۵۳۵-	۳	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۶۴۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۶۴۰	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۶۹۰-	۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۶٫۵۹۲	<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۱۱۱	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۲٫۴۴۰-	۵	<sup>۳۱۰</sup> ×۵٫۳۸۲	<sup>۳۱۰</sup> ×۵٫۷۷۱	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۲٫۱۲۰-	۶	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۰۵۸	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۳۶۳	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۹٫۹۸۱-	۷	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۰۹۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۲۳۴	NaCl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۲۳۵-	۱	<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۴۹۹	<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۸۴۰	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۲٫۰۴۴-	۲	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۶۵۲	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۷۲۳	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۴۳۷-	۳	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۶۳۱	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۶۵۵	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۹۹۰-	۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۶٫۹۷۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۷٫۱۴۵	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۸۶۰-	۵	<sup>۳۱۰</sup> ×۵٫۶۷۹	<sup>۳۱۰</sup> ×۵٫۸۵۴	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۶۴۰-	۶	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۳۰۶	<sup>۳۱۰</sup> ×۳٫۴۷۷	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O
<sup>۳۱۰</sup> ×۲٫۳۴۰-	۷	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۲۱۴	<sup>۳۱۰</sup> ×۱٫۳۰۶	NH <sub>4</sub> Cl.H <sub>2</sub> O

بعنوان نمونه در شکل ۲- نمودارهای شمارش مربوط به پرتو گامای چشمه <sup>137</sup>Cs بر حسب چگالی های مختلف محلول NH<sub>4</sub>Cl.H<sub>2</sub>O به ترتیب برای فوتون های عبوری ثبت شده در آشکارساز در موقعیت شماره ۴ و فوتون های پس پراکنده ثبت شده در آشکارساز در موقعیت شماره ۱، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نسبت های شمارش تقریباً به طور خطی با چگالی سیال تغییر می کنند، لذا نتایج با یک تابع خطی برازش داده شد.



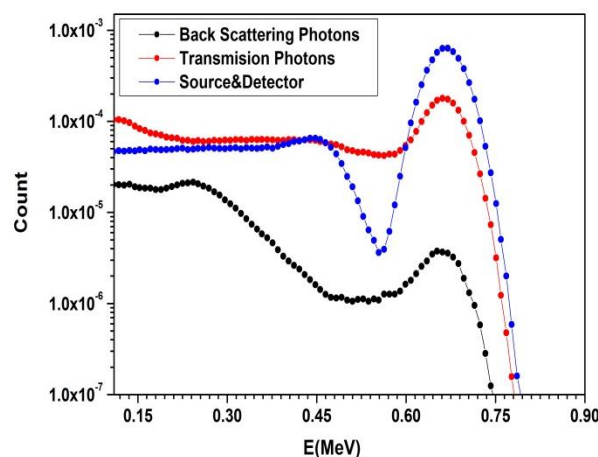


# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل ۲- شمارش پرتو گاما بر حسب چگالی برای فوتون‌های عبوری ثبت شده در آشکارساز در موقعیت‌های ۱ و ۴.

همچنین طیف ارتفاع پالس ثبت شده در آشکارساز واقع در موقعیت‌های ۱ و ۴ برای محلول  $\text{NH}_4\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$  در معرض پرتوهای گامای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  در شکل ۳- نشان داده شده است.



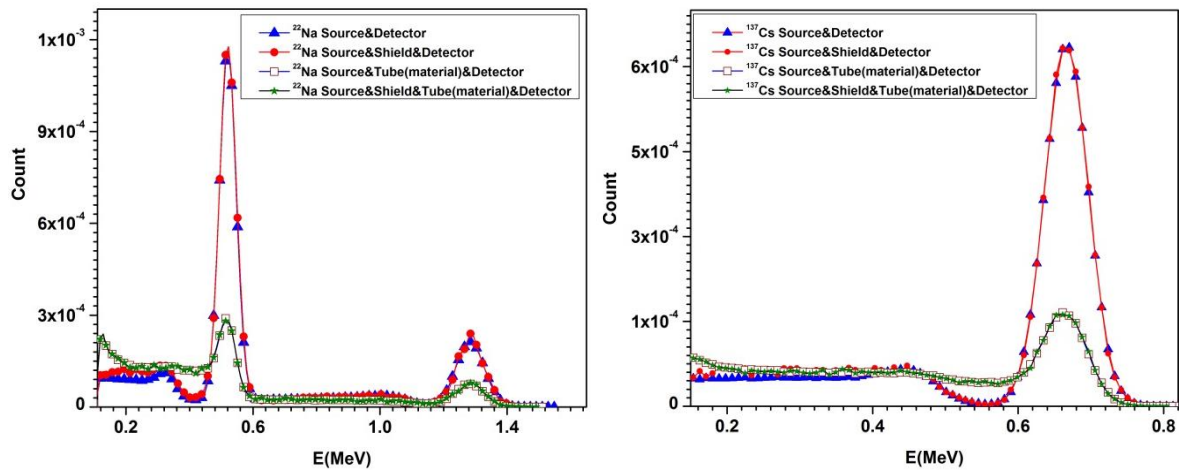
شکل ۳- طیف مربوط به پرتوهای گامای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  ثبت شده در آشکارسازهای موقعیت‌های ۱ و ۴ برای محلول  $\text{NH}_4\text{Cl}\cdot\text{H}_2\text{O}$  و همچنین طیف پرتوهای مستقیم بدون حضور ماده.

بعلاوه جهت برآورد تغییر طیف در اثر عوامل گوناگون، طیف ارتفاع پالس مربوط به محلول  $\text{NaCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$  در معرض دو چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{22}\text{Na}$  برای چهار وضعیت مختلف: (۱) حضور چشمه و آشکارساز، (۲) چشمه، حفاظ سربی و آشکارساز، (۳) چشمه، ماده و آشکارساز، (۴) چشمه، حفاظ سربی، ماده و آشکارساز، در شکل ۴ رسم شده است.



# بیت و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۴- ملاحظه تأثیر عوامل مختلف در طیف ارتفاع پالس آشکارساز (موقعیت ۴) در حضور چشمه‌های  $^{22}\text{Na}$  و  $^{137}\text{Cs}$

با توجه به شکل ۴- درمی‌یابیم که طیف مربوط به وضعیت‌های (۱ و ۲) و همچنین وضعیت‌های (۳ و ۴) بسیار به یکدیگر نزدیکند، به عبارتی حفاظ سربی علاوه بر اینکه به خوبی از پراکندگی پرتوهای گاما جلوگیری می‌کند، تأثیر بسیار ناچیزی در طیف ثبت شده توسط آشکارساز خواهد داشت.

## بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که در شکل ۲- دیده می‌شود، شمارش گاما تقریباً به طور خطی با چگالی سیال تغییر می‌کند. با برازش یک تابع خطی برای نتایج، مشخص می‌شود که از بین هفت مکان تعبیه‌شده برای آشکارساز، موقعیت شماره ۴ نسبت به بقیه شیب تضعیف و کاهش شمارش بیشتری را نسبت به افزایش چگالی داراست. در نظر گرفتن موقعیت ۴ به عنوان موقعیت بهینه در واقع انتخاب روش عبوری است. نتایج شبیه‌سازی اولیه نشان می‌دهد که شیب نمودار در وضعیت عبوری (موقعیت ۴) حدود ۵.۵ برابر شیب در وضعیت پس‌پراکندگی (موقعیت ۱) می‌باشد. به هر حال هرگاه دسترسی به دو طرف ماده امکان‌پذیر نباشد و یا قطر لوله حاوی ماده خیلی بزرگ باشد، ممکن است روش پراکندگی تنها راه چاره باشد. در خصوص محاسبه  $\mu_m$  چون در اینجا از چشمه  $^{22}\text{Na}$  استفاده شده، که دارای دو انرژی مشخص  $0.511\text{MeV}$  و  $1.274\text{MeV}$  می‌باشد، روش میانگین‌گیری مناسب نبوده و بهتر است که از کد محاسباتی MCNP4C برای محاسبه  $\mu_m$  استفاده شود. همچنین در نظر گرفتن حفاظ سربی برای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و یا  $^{22}\text{Na}$  علاوه بر جلوگیری از شمارش فوتون‌های پس‌پراکنده محیط اطراف توسط آشکارساز، تأثیری در نتیجه مورد نظر (طیف ارتفاع پالس) ندارد.





# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## مراجع

- [1] M.L. Gol'din; Uses of radioactive isotopes in the mining and ore processing industry; .(1961) *Atom. Energy J.* 9 (3) 753–754
- [2] D.J. Cown and B.C. Clement; A wood densitometer using direct scanning with X-rays; .(1983) *Wood. Sci. Technol.* **17** (2) 91–99
- [3] K.G. Carr-Brion; Performance of an on-stream radioisotope X-ray fluorescence analyzer; .(1967) *Trans, Inst. Min. Metall. (Sect. C)* **76** C94–C100
- [4] M. Khorsandi and S.A.H. Fegghi; Design and construction of a prototype gamma-ray densitometer for petroleum products monitoring applications; *Measurement* **44**, 1512–1515 .(2011)
- [5] G. Schlieper, W.J. Huppmann and A. Kozuch; Non-destructive Determination of sectional Densities by the Gamma Densomat; *Progress in Powder Metallurgy*, **43**, 351-362 (1987).
- [6] M. Mauc̆ec and I. Denijs; Development and calibration of a  $\gamma$ - ray density-meter for .(2009) sediment-like materials; *Applied Radiation and Isotopes* **67**, 1829–1836