

## بررسی تأثیر موقعیت نسبی چشمه و سوسون در بازدهی سوسون پلاستیک مکعبی بزرگ

مختار یداللهی روشن<sup>1</sup>، مجتبی تاجیک<sup>1\*</sup>، رضا قلی‌پور پیوندی<sup>2</sup>

<sup>1</sup>گروه فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

<sup>2</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت: 1396/06/11 ویرایش نهایی: 1396/11/08 پذیرش: 1396/11/16

### چکیده

در این پژوهش، اثر موقعیت نسبی چشمه گاما و سوسون، بر بازدهی یک سوسون پلاستیک بزرگ (50cm×50cm×5cm)، به‌طور نظری و تجربی بررسی شده است. برای این منظور تابع پاسخ سوسون NE102 که در معرض چشمه <sup>137</sup>Cs که در موقعیت‌های مختلف نسبت به سوسون قرار گرفته است، با استفاده از کد MCNPX-PHOTRACK شبیه‌سازی و سپس اندازه‌گیری شده است. با استفاده از توابع پاسخ به‌دست آمده، میزان تغییرات نسبی بازدهی شبیه‌سازی و تجربی برای موقعیت‌های مختلف چشمه محاسبه شد. سپس اثر موقعیت نسبی چشمه و سوسون بر روی بازدهی با محاسبه زاویه فضایی نسبی تشکیل شده از سوسون در محل چشمه به‌صورت تحلیلی بررسی شد. نتایج تحلیلی با تجربی و شبیه‌سازی مقایسه و میزان حساسیت بازدهی سوسون به تغییر زاویه فضایی به‌صورت تابعی از موقعیت نسبی سوسون و چشمه مشخص شده است. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی همخوانی خوبی را نشان می‌دهند.

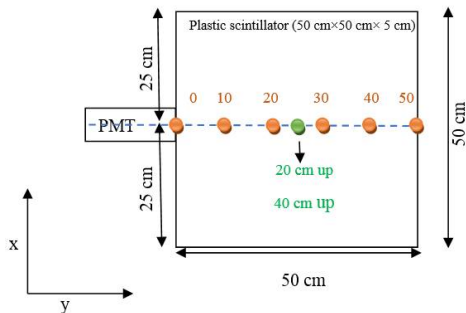
**کلیدواژگان:** سوسون پلاستیک مکعبی بزرگ، بازدهی، زاویه فضایی

### مقدمه

مطلق نه تنها به‌ویژگی سوسون بلکه به‌جزئیات هندسه آشکارساز سوسون (فاصله چشمه پرتوزا تا سوسون) بستگی دارد [1]. سوسون پلاستیک از نوع NE102 به‌خاطر کاربرد وسیع و آسان و مواردی که امکان ساخت سوسون در اندازه بزرگ و اشکال مختلف و یا سریع بودن آشکارساز مورد نیاز هستند، استفاده می‌شود. سوسون‌های مکعبی بزرگ در حال حاضر در دروازه‌های ورودی و خروجی مراکز هسته‌ای برای تشخیص مواد پرتوزا، در مراکز پزشکی هسته‌ای برای تعیین آلودگی پرتوی افراد (شمارنده کل بدن)، کالیبراسیون انرژی طیف‌های گاما با استفاده از سینماتیک کامپتون و در تلسکوپ ردیاب پرتوهای

در تمام آشکارسازهای هسته‌ای یک پالس خروجی به‌ازای هر کوآنتم تابش برهم‌کنش‌کننده در داخل حجم فعال سوسون تولید می‌شود. اما تابش‌های بدون بار مانند پرتوهای گاما برهم‌کنش‌های قابل توجه‌ای در سوسون باید انجام دهند تا امکان آشکارسازی وجود داشته باشد. چون این تابش‌ها فاصله زیادی را در بین برهم‌کنش‌ها طی می‌کنند بازدهی کمتر از 100% دارند. بنابراین بررسی میزان تأثیر عوامل مختلف بر بازدهی نقش مهمی در میزان تعداد تپ شمارش شده به تعداد فوتون‌های گسیلی چشمه دارد. با توجه به‌اینکه بازدهی

\* نویسنده مسئول: tajik@du.ac.ir



شکل 1. سوسوزن پلاستیک NE102 با ابعاد  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 5\text{cm}$  که در معرض چشمه  $^{137}\text{Cs}$  با موقعیت‌های مختلف  $^{137}\text{Cs}$  قرار گرفته است.

### مطالعات شبیه‌سازی

#### محاسبه تابع پاسخ و بازدهی سوسوزن با استفاده از کد تلفیقی MCNPX-PHOTRACK

ابتدا هندسه، مواد، موقعیت چشمه، انرژی چشمه و نوع آماره برای کد MCNPX [10] تعیین می‌شود. به منظور بررسی اثر فاصله و موقعیت نسبی چشمه و آشکارساز بر تابع پاسخ، چشمه در راستای طول سوسوزن (جهت  $z$ ها) و در جهت عمود بر صفحه سوسوزن (محور  $z$ ها) مطابق با شکل 1 حرکت داده شد. تابع پاسخ سوسوزن برای هر موقعیت چشمه نقطه‌ای مطابق با شکل 1 با استفاده از کد تلفیقی MCNPX-PHOTRACK [8] شبیه‌سازی شده است. با استفاده از کد تلفیقی MCNPX-PHOTRACK (در قالب یک برنامه پس پردازش که در آن، خروجی کارت PTRAC به کد PHOTRACK داده می‌شود)، تابع پاسخ سوسوزن که در معرض چشمه نقطه‌ای گاما قرار گرفته، شبیه‌سازی می‌شود. در برنامه پس پردازش، و با توجه به نوع برهم‌کنش تابش گاما، انرژی گامای اولیه، ثانویه و موقعیت برهم‌کنش در فایل خروجی PTRAC، میزان انباشت انرژی، ناشی از برهم‌کنش‌های فوتون در سوسوزن محاسبه و سپس با فراخوانی کد PHOTRACK، در همان محل انباشت انرژی، فوتون مرئی تولید و ترابرد می‌شود. در گام‌های

کیهانی برای اندازه‌گیری و آشکارسازی پرتوهای کیهانی به کار برده می‌شود [6-2]. در کاربردهای ذکر شده به علت پایین بودن بازدهی ذاتی سوسوزن‌های پلاستیک، به منظور افزایش بازدهی برای آشکارسازی پرتوهای گاما، حجم سوسوزن پلاستیک را افزایش می‌دهند اما با افزایش حجم یا به عبارتی ابعاد سوسوزن، بازدهی آشکارساز به شدت تحت تأثیر، دو عامل تضعیف نور سوسوزنی و موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن قرار می‌گیرد. هدف از این پژوهش بررسی کیفی و کمی نقش موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن بر تابع پاسخ و بازدهی آشکارساز سوسوزن مکعبی با ابعاد بزرگ است. در سوسوزن‌ها با ابعاد بزرگ، به منظور برآورد دقیقی از بازدهی سوسوزن، ترابرد نور سوسوزنی بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در زمینه ترابرد نور سوسوزنی رنجبر و همکاران اثر نوربر و پوشش آن را به طور تجربی و نظری بر تابع پاسخ یک آشکارساز پلاستیک استوانه‌ای به قطر و طول 2 اینچ بررسی نموده‌اند [7]. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی دقیق تابع پاسخ از کد تلفیقی MCNPX-PHOTRACK استفاده شده است [8،9]. این کد توانایی شبیه‌سازی تابع پاسخ سوسوزن به همراه ترابرد فوتون مرئی را دارد. در شبیه‌سازی‌ها اثر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن بر تابع پاسخ بررسی و با توابع پاسخ تجربی به دست آمده، مقایسه شده و میزان تأثیر نسبی موقعیت چشمه بر تابع پاسخ سوسوزن و بازدهی تعیین شده است. به منظور انجام تحقیق، سوسوزنی به شکل مکعب مستطیل به طول و عرض  $50\text{cm}$  و ضخامت  $5\text{cm}$  مطابق با شکل 1 در معرض چشمه نقطه‌ای  $^{137}\text{Cs}$  قرار گرفته است. این چشمه تابش گامایی با انرژی  $0.662\text{MeV}$  گسیل می‌کند. در بررسی‌های شبیه‌سازی و تجربی چشمه نقطه‌ای بر روی سطح سوسوزن قرار داده و از کولیماتور استفاده نشده است.

با استفاده از رابطه 1 زاویه فضایی برای موقعیت‌های مختلف چشمه نسبت به سوسوزن محاسبه شده و نتایج آن در جدول 1 آمده است.

### مطالعات تجربی

به منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی، پاسخ تجربی سوسوزن آلی پلاستیک مکعبی (NE102) با ابعاد  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 50\text{cm}$  نسبت به گاماهاى چشمه  $^{137}\text{Cs}$  نقطه‌ای با قدرت 500 میکرو کوری متناظر با موقعیت‌های شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. اجزاء استفاده شده برای اندازه‌گیری تابع پاسخ آشکارساز عبارتند از: واحد HV مدل NHQ105M از شرکت FASTComTec، دستگاه PreAMP مدل 3001 از مؤسسه IAP، واحد Spectroscopy AMP مدل 3600 از مؤسسه IAP، واحد ADC مدل 7072 از شرکت FASTComTec، و نرم‌افزار داده برداری مدل DAS از مؤسسه IAP. با فرار دادن چشمه  $^{137}\text{Cs}$  مطابق با موقعیت‌های نشان داده شده در شکل 1 طیف تابع پاسخ آشکارساز اندازه‌گیری شد. در این اندازه‌گیری‌ها ولتاژ آستانه (Threshold) اعمال شده به تحلیل‌گر چند کاناله (MCA) 0/5 ولت می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری توابع پاسخ به دست آمده در شکل 2 نشان داده شده است. در این شکل با دور شدن چشمه از PMT به عبارتی حرکت چشمه در راستای محور  $y$ ، لبه کامپتون طیف به دلیل افزایش تضعیف نور سوسوزنی در داخل سوسوزن تابع پاسخ به سمت کانال‌های پایین‌تر سوق پیدا می‌کند. در شکل 2 نمودار قرمز رنگ برای حالتی است که چشمه نزدیکترین موقعیت را به PMT دارد و به علت کمترین تضعیف نور سوسوزنی در این حالت طیف تابع پاسخ از کانال‌های بالاتر نسبت به سایر موقعیت‌ها شروع شده است.

بعدی، به مرور از وزن آماری اولیه این فوتون‌های مرئی کاسته می‌شود و نهایتاً وزن نهایی آنها با ورود به فوتوکاتد ثبت می‌شود. میانگین وزن ثبت شده در فوتوکاتد، در انباشت انرژی برای هر فوتون محاسبه می‌گردد. هنگامی که فرآیندهای ذکر شده برای تعداد زیادی از فوتون‌های فرودی تکرار شود، رسم منحنی فراوانی نور کل تراپرد شده، مانسته طیف ارتفاع تپ سوسوزن خواهد بود. به منظور بررسی کمی اثر موقعیت نسبی چشمه بر تابع پاسخ سوسوزن، بازدهی به‌عنوان یک پارامتر مهم در آشکارسازی برای هر موقعیت چشمه محاسبه شد. در این محاسبات، بازدهی سوسوزن به صورت  $E = N_{\text{detected}}/N_{\text{emitted}}$  تعریف می‌شود که در آن  $N_{\text{detected}}$  و  $N_{\text{emitted}}$  به ترتیب تعداد گامای شمارش شده توسط آشکارساز سوسوزن و تعداد گامای گسیل شده توسط چشمه  $^{137}\text{Cs}$  است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های 3، 4، و 5 جدول 1 ارایه شده است.

### محاسبات تحلیلی زاویه فضایی نسبی تشکیل

#### شده از سوسوزن در محل چشمه

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، فاصله بین چشمه تا آشکارساز بر مقدار بازدهی تأثیر می‌گذارد به طوری که با تغییر فاصله بین آشکارساز و چشمه تعداد ذرات وارد شده به آشکارساز تغییر می‌کند، این اثر را می‌توان به‌طور تحلیلی با محاسبه زاویه فضایی نسبی تشکیل شده از آشکارساز در محل چشمه، برای هر موقعیت چشمه محاسبه نمود. برای محاسبه زاویه فضایی فرض می‌کنیم، یک سوسوزن با روزنه مستطیلی به مساحت  $ab$  که به فاصله  $d$  از یک چشمه همسانگرد نقطه‌ای قرار گرفته است، زاویه فضایی عبارت است از [11]:

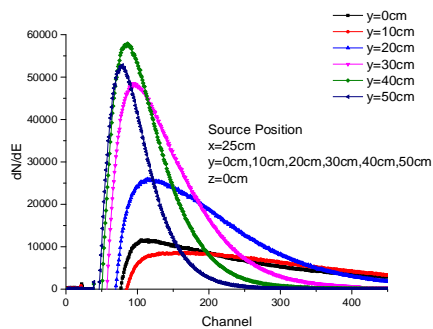
$$\Omega = \frac{1}{4\pi} \arctan \frac{ab}{d\sqrt{a^2 + b^2 + d^2}} \quad 1$$

## نتایج

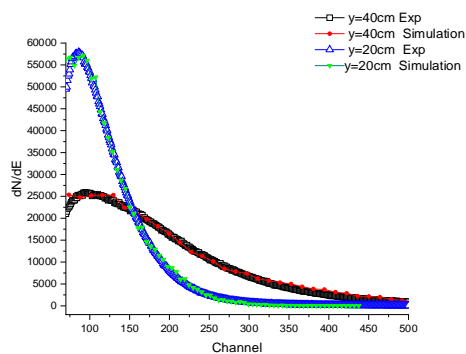
مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری شده  
تابع پاسخ آشکارساز NE102

پس از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تابع پاسخ سوسوزن مورد نظر برای هر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد. به‌منظور مقایسه توابع پاسخ تجربی و شبیه‌سازی، لبه کامپتون طیف‌های تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر تطبیق داده شد [12 و 13]. نتایج مقایسه‌ها در شکل‌های 3 و 4 نشان می‌دهد نتایج تجربی و شبیه‌سازی همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. در این شکل‌ها به‌طور کیفی تأثیر موقعیت چشمه نسبت به سوسوزن بر روی تابع پاسخ به‌خوبی مشاهده می‌شود.

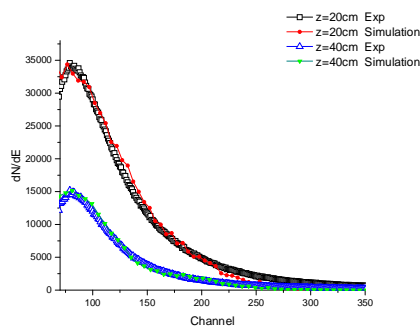
با توجه به نتایج جدول 1 می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که چشمه در مرکز سوسوزن یعنی  $x=y=25\text{cm}$  و  $z=0\text{cm}$  واقع است بیشترین بازدهی به‌دست می‌آید، محاسبات تحلیلی نیز نشان می‌دهند که در این موقعیت بیشترین زاویه فضایی حاصل می‌شود لذا بیشترین ذرات گسیلی وارد سوسوزن می‌شوند. هر چه چشمه از مرکز سوسوزن دور می‌شود زاویه فضایی حاصله کاهش می‌یابد بنابراین تعداد کمتری از فوتون‌های گامای حاصل از چشمه وارد سوسوزن شده و بنابراین بازدهی کاهش خواهد یافت. در شکل 4 تابع پاسخ سوسوزن برای حالتی به‌دست آورده شده است که چشمه در راستای محور Zها و بر روی محور عبوری از مرکز جرم در فواصل 20cm و 40cm بالاتر از سطح بالایی آشکارساز قرار داده شده است. با افزایش دو برابری در فاصله، زاویه فضایی تقریباً 2/5 برابر کاهش یافته و به‌همان نسبت نیز بازدهی کاهش می‌یابد.



شکل 2. تابع پاسخ طیف تجربی آشکارساز سوسوزن پلاستیک به‌شکل مکعب به ابعاد  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 5\text{cm}$  که در معرض چشمه  $^{137}\text{Cs}$  قرار گرفته است. چشمه در راستای محور yها از  $y=0\text{cm}$  تا  $y=50\text{cm}$  با گام 10cm حرکت می‌کند در حالی که  $x=25\text{cm}$  و  $z=0\text{cm}$  می‌باشد.



شکل 3. مقایسه بین تابع پاسخ طیف تجربی و شبیه‌سازی، آشکارساز سوسوزن پلاستیک به‌شکل مکعب به ابعاد  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 5\text{cm}$  که در معرض چشمه  $^{137}\text{Cs}$  در دو موقعیت مختلف (با مختصات  $x=25\text{cm}$  و  $z=0\text{cm}$ ،  $y=20\text{cm}$  و  $z=0\text{cm}$ ،  $y=40\text{cm}$ ،  $x=25\text{cm}$ ) قرار گرفته است.



شکل 4. مقایسه بین تابع پاسخ تجربی و شبیه‌سازی، آشکارساز سوسوزن پلاستیک مکعبی به ابعاد  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 5\text{cm}$  که در معرض چشمه  $^{137}\text{Cs}$  در دو موقعیت مختلف با مختصات  $x=y=25\text{cm}$  با  $z=20\text{cm}$  و  $z=40\text{cm}$  قرار گرفته است.

با توجه به اینکه از نظر کیفی همخوانی خوبی بین توابع پاسخ شبیه‌سازی و تجربی در شکل‌های 3 و 4 مشاهده

$$E_{Rel} = \frac{E_{exp}(25,0,0)}{E_{exp}(25,20,0)} = \frac{N_{exp}(25,0,0)}{N_{exp}(25,20,0)} = 0.486$$

با توجه به مقادیر جدول 1 همین نتیجه برای بازدهی نسبی شبیه‌سازی برای این مقدار تغییر موقعیت به دست می‌آید.

جدول 1. بازدهی، زاویه فضایی محاسبه شده و خطای نسبی بازدهی برای سوسوزن NE102، به شکل مکعب مستطیل به ابعاد 50cm×50cm×5cm برای موقعیت‌های مختلف چشمه  $^{137}\text{Cs}$  مطابق با شکل 1.

موقعیت چشمه (xcm, ycm, zcm)	بازدهی (%)	زاویه فضایی $\Omega$ (rad)	$\varepsilon$ (%)
(25.0,0.0)	15,64	0,374	4,76
(25.1,0.0)	29,65	0,494	4,13
(25.2,0.0)	30,71	0,511	3,90
(25.3,0.0)	30,70	0,511	3,52
(25.4,0.0)	29,65	0,498	1,72
(25.5,0.0)	15,66	0,374	3,58
(25.0,20)	7,81	0,212	7,19
(25.0,40)	3,11	0,09	7,87

در شکل 5 تغییرات بازدهی سوسوزن برحسب موقعیت نسبی چشمه-سوسوزن بر اساس داده‌های جدول 1 نشان داده شده است در این شکل تغییرات بازدهی سوسوزن برحسب موقعیت نسبی چشمه-سوسوزن به‌طور کیفی قابل مشاهده است. همان‌طور که شکل‌های 5-2 و داده‌های جدول 1 نشان می‌دهند، وقتی چشمه را در جهت محور  $y$ ها جابه‌جا می‌کنیم بازدهی آشکارساز به‌نحو تغییر می‌کند که در  $y=20\text{cm}$  و  $y=30\text{cm}$  که تقریباً در مرکز آشکارساز قرار دارد، بیشترین بازدهی، به دست می‌آید. وقتی چشمه در مرکز باشد احتمال فرار ذرات نسبت به وقتی که چشمه در لبه آشکارساز قرار دارد کمتر می‌شود. برای چشمه در  $y=0\text{cm}$  بازدهی آشکارساز، 15,64 درصد و برای موقعیت  $y=20\text{cm}$ ، بازدهی برابر 30,70 درصد به دست آمد. به عبارتی با تغییر محل چشمه از 0 به 20 سانتی‌متر

می‌شود، به‌منظور برآوردی کمی از میزان همخوانی نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی، سطح زیر منحنی طیف‌های تابع پاسخ شبیه‌سازی و تجربی محاسبه شد. مقدار سطح به دست آمده همان شمارش‌ها است، با استفاده از رابطه 2 [9]:

$$\varepsilon = (N_{exp} - N_{MCNPX-PHOTRACK}) / N_{exp} \quad 2$$

خطای نسبی شمارش‌ها محاسبه گردید. در این رابطه  $N_{exp}$ ، شمارش‌های به دست آمده از نتایج تجربی و  $N_{MCNPX-PHOTRACK}$ ، شمارش‌های به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و  $\varepsilon$  خطای نسبی شمارش می‌باشد. نتایج محاسبات، خطای نسبی 2 تا 8 درصد را نشان می‌دهد. با استفاده از شمارش‌های به دست آمده می‌توان میزان تغییرات بازدهی نسبی تجربی برای موقعیت‌های نسبی چشمه و سوسوزن به دست آورد. با توجه به اینکه ذرات گسیلی از چشمه نقطه‌ای برای همه موقعیت‌های چشمه در مدت زمان اندازه‌گیری ثابت است و فقط تعداد ذرات ثبت شده در آشکارساز در هر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن تغییر خواهد کرد. برای بررسی میزان تغییرات نسبی بازدهی برای موقعیت‌های مختلف چشمه می‌توان با استفاده از رابطه 3 نسبت شمارش‌های تجربی در هر موقعیت را به دست آورد. در رابطه 3  $E_{Rel}$ ، بازدهی نسبی،  $E_{exp}(x, y, z)$ ، بازدهی تجربی در موقعیت  $(x, y, z)$  و  $N_{exp}(x', y', z')$ ، شمارش‌های اندازه‌گیری شده در موقعیت  $(x', y', z')$  می‌باشد [9].

$$E_{Rel} = \frac{E_{exp}(x, y, z)}{E_{exp}(x', y', z')} = \frac{N_{exp}(x, y, z)}{N_{exp}(x', y', z')} \quad 3$$

به‌عنوان مثال با استفاده از رابطه 3، با تغییر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن از مختصات (25,0,0) به مختصات (25,20,0) باعث افزایش نسبی تقریباً 50 درصدی در بازدهی آشکارساز می‌شود.

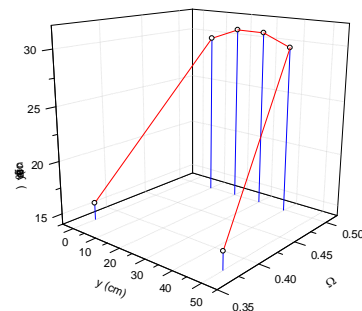
### تحلیل حساسیت بازدهی سوسوزن

با توجه به اینکه بازدهی سوسوزن‌ها در طیف نگاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حساسیت نتایج محاسباتی بازدهی نسبت به تغییرات زاویه فضایی بررسی شده است تا میزان تأثیر این کمیت بصورت تابعی از فاصله مابین چشمه و سوسوزن بر بازدهی به‌طور صریح روشن شود. در تحلیل حساسیت، تغییرات یک کمیت (کمیت اول) که تابع کمیت دیگری (کمیت دوم) است در اثر تغییرات کمیت دوم محاسبه می‌شود [14]. در اینجا با کمیت بازدهی سروکار داریم که این کمیت وابسته به زاویه فضایی است که این زاویه خود تابع فاصله نسبی چشمه تا سوسوزن است. براساس این تحلیل حساسیت بازدهی چنین تعریف می‌شود [15]:

$$S = \frac{\Delta E/E}{\Delta \Omega/\Omega} \quad 4$$

که در رابطه 4،  $S$  حساسیت بازدهی،  $\Delta E$  تغییرات بازدهی،  $E$  بازدهی،  $\Delta \Omega$  تغییرات زاویه فضایی و  $\Omega$  زاویه فضایی است. نتایج محاسبه تحلیل حساسیت بازدهی در شکل 5 نشان داده شده است. شکل‌های 5 و 6 نشان می‌دهند در بازه  $0\text{cm} < y < 15\text{cm}$  و  $y > 25\text{cm}$  بازدهی دارای حساسیت بالایی نسبت به تغییرات زاویه فضایی است. بنابر این با توجه به رابطه 4 حساسیت می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات بازدهی در این موقعیت‌ها نسبت به سایر نقاط بیشتر است. در حوالی  $y = 25\text{cm}$  (مرکز صفحه سوسوزن) حساسیت به زاویه فضایی کم است. بنابر این تغییرات بازدهی در حوالی این مکان ناچیز است. حساسیت بازدهی با تغییرات مکان چشمه در راستای محور  $y$ ها به مراتب کمتر از راستای محور  $z$ ها است. به‌طوری‌که با تغییر مکان چشمه از  $y = 20\text{cm}$  تا  $y = 40\text{cm}$ ، حساسیت بازدهی برابر با  $0/65$  ولی با همین اندازه تغییر مکان چشمه در راستای محور  $z$ ها حساسیت بازدهی  $1/2$  خواهد بود.

بازدهی آشکارساز به میزان  $15/04$  درصد افزایش یافته است و همچنین هنگامی که چشمه را از آشکارساز جدا می‌کنیم و آن را  $20$  و  $40$  سانتی‌متر بالاتر از مرکز آشکارساز قرار می‌دهیم بازدهی افتی چشمگیر پیدا می‌کند برای جابه‌جایی  $20$  سانتی‌متر  $23$  درصد و برای جابه‌جایی  $40$  سانتی‌متری  $27/5$  درصد نسبت به حالتی که چشمه روی سطح سوسوزن است، بازدهی کاهش پیدا می‌کند. از نتایج جدول 1 مشاهده می‌شود که هرچه چشمه گاما از لبه سوسوزن دور شده و به محور عبوری از مرکز جرم سوسوزن نزدیک می‌شود زاویه فضایی نسبی تشکیل شده از سوسوزن در محل چشمه افزایش یافته و با توجه به رابطه مستقیم و خطی زاویه فضایی و بازدهی مقدار بازدهی متناسب با افزایش زاویه فضایی، افزایش می‌یابد. بنابراین بیشترین بازدهی بر روی محور عبوری از مرکز جرم سوسوزن به دست آمده که در این حالت بیشترین زاویه فضایی نسبی تشکیل شده از سوسوزن در محل چشمه را داریم. نتایج حاصل تجربی، شبیه‌سازی و تحلیلی در جدول 1 و شکل 5 نشان می‌دهند که با کاهش زاویه فضایی، بازدهی سوسوزن نیز کاهش می‌یابد.

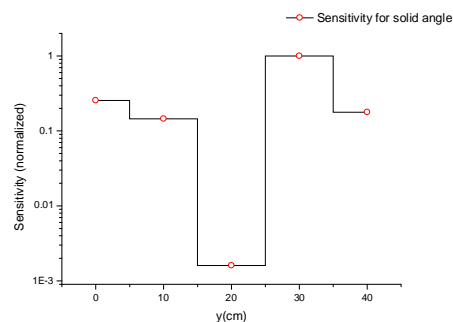


شکل 5. تغییرات بازدهی محاسبه شده، سوسوزن برحسب موقعیت نسبی چشمه-سوسوزن و زاویه فضایی برای سوسوزن پلاستیک NE102، با ابعاد  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 5\text{cm}$  که در معرض چشمه  $^{137}\text{Cs}$  قرار گرفته است.

می‌شود، بازدهی تقریباً به 0/1 برابر مقدار بیشینه کاهش می‌یابد. نتایج کمی این تحقیق می‌تواند معیار کمی خوبی برای طراحی و ساخت سوسوزن‌های بزرگ مکعبی به‌منظور استفاده در کاربردهای مختلف تحقیقاتی، صنعتی و پزشکی باشد.

### مرجع‌ها

- [1] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurements*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, (2000).
- [2] R. Gholipour Payvandi, et al., A new automated and precise calibration method for gamma level gauges with rod detector arrangement, *Applied Radiation and Isotopes*, **112** (2016) 1–4.
- [3] J. Nilsson, M. Isaksson, A comparison between monte carlo-calculated and measured total efficiencies and energy resolution for large plastic scintillators used in whole-body counting, *Radiation Protection Dosimetry* **144** (2011) 555–559.
- [4] Y. kim, et al., Plastic scintillator for radiation dosimetry, *Radiation Protection Dosimetry*, **170** (2016) 187–190.
- [5] E.R. Siciliano, et al., Energy calibration of gamma spectra in plastic scintillators using Compton kinematics, *nuclear instruments and methods in physics research A* **594** (2008) 232–243.
- [6] M. Bahmanabadi, A. Anvari, G. Rastegarzadeh, J. Samimi, M. Lamahi Rachti, Comparison of the performance of various light enclosures for extensive air shower experiments, *Experimental Astronomy* **8** (1998) 211–229.
- [7] M. Ranjbar Kohan, G.R. Etaati, N. Ghal-Eh, M.J. Safari, H. Afarideh, E. Asadi, Modelling plastic scintillator response to gamma rays using light transport Incorporated FLUKA code, *Applied Radiation and Isotopes* **70** (2012) 864–867.
- [8] M. Tajik, N. Ghal-Eh, G.R.Etaati, H. Afarideh, Modelling NE213 scintillator response to neutrons using an MCNPX-PHOTRACK



شکل 6. حساسیت بازدهی سوسوزن به زاویه فضایی نسبی تشکیل شده از سوسوزن در محل چشمه.

### نتیجه‌گیری

تابع پاسخ سوسوزن پلاستیک NE102 با ابعاد بزرگ با استفاده از توانمندی کد مونت کارلوی MCNPX-PHOTRACK شبیه‌سازی و سپس اندازه‌گیری شد. با استفاده از توابع پاسخ به‌دست آمده تأثیر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن بر بازدهی (شمارش‌های ثبت شده) به‌صورت نظری و تجربی بررسی شده است. مطالعات نشان می‌دهند، حساسیت بازدهی سوسوزن علاوه بر فاصله چشمه، به‌راستای تغییرات مکان از سطح سوسوزن وابسته است. به‌طوری‌که این حساسیت به تغییر مکان چشمه در راستای عمود بر سطح سوسوزن به‌مراتب بیشتر نسبت به‌راستای سطح سوسوزن می‌باشد. در بررسی‌ها کمی بیشترین بازدهی برای سوسوزن NE102 با هندسه مکعب مستطیل به ابعاد 50cm×50cm×5cm برای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  مقدار 30/71 درصد به‌دست آمد. این مقدار برای موقعیتی است که چشمه بر روی سطح آشکارساز و در مرکز آن واقع باشد. هنگامی که چشمه  $^{137}\text{Cs}$  روی سطح سوسوزن و در بیشترین فاصله و کمترین فاصله تا PMT قرار می‌گیرد، بازدهی تقریباً به نصف مقدار بیشینه کاهش می‌یابد. هنگامی که چشمه به اندازه 40cm از مرکز سطح سوسوزن و در راستای عمود بر سطح دور

- [15] D.G. Cacuci, Sensitivity and uncertainty analysis: theory. Vol. 1, CRC Press, Chapman and Hall, (2003).
- hybrid code, *Nuclear Instruments and Methods A* **704** (2013) 104–110.
- [9] M. Tajik, N. Ghal-Eh, G.R. Etaati, H. Afarideh, NE213/BC501A scintillator-lightguide assembly response to  $^{241}\text{Am}$ -Be neutrons using an MCNPX-PHOTRACK hybrid code simulation, *Radiation physics and Chemistry* **94** (2014) 319-324.
- [10] J.S. Hendricks, et al., *MCNPX 2.6.0 Extensions Report LA-UR-08-2216*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, United States, (2008).
- [11] H. Gotoh, H.Yagi, Solid angle subtended by a rectangular slit, *Nuclear Instruments and Methods* **96** (1971) 485-486.
- [12] ZHANG Su-Ya-La-Tu, Study on gamma response function of EJ301 organic liquid scintillator with GEANT4 and FLUKA, *Chinese Physics C* Vol. 37, No. 12 (2013) 126003.
- [13] G. Dietze, H. Klein, Gamma-calibration of NE 213 scintillation counters, *Nuclear Instruments and Methods A* **193** (1982) 549-556.
- [14] H. Rief, An attempt of sensitivity calculations in 3D geometries by Monte Carlo techniques. Proceedings of the specialists' Meeting on Sensitivity Studies and Shielding Benchmark, OECD, Paris, (1975).