# مقایسه کد­های مونت کارلوی FLUKA،CECIL و SCINFUL-QMDدر شبیه­سازی تابع پاسخ سوسوزن آلی BC501A در انرژی­های 200 تا 800 مگا الکترون ولت

# مجتبی تاجیک1 و احد قوامی2

# 1دانشیار ، دانشگاه دامغان، دامغان ، [tajik@du.ac.ir](mailto:tajik@du.ac.ir)

2دانشجوی دکتری ، دانشگاه دامغان، دامغان، ، a.ghavami@std.du.ac.ir

**چکیده**

ارزیابی درست از برهمکنش نوترون با مواد سوسوزنی و به دنبال آن تولید نور در انرژی­های مختلف نوترون، در محاسبه تابع پاسخ عامل مهمی به شمار می­آید. به­دلیل پیچیده بودن تولید نور در این سوسوزن­ها، با روش­های مونت کارلو معمول شبیه­سازی تابع پاسخ مشکل بنظر می­رسد. در این پژوهش ، محاسبه نور خروجی با کمک کارت­های­ EVENTBIN و TCQUENCH کد FLUKA در دستور کار قرار گرفت. با استفاده از نورهای خروجی حاصل شده از پاسخ آشکارساز BC501A که در معرض نوترون­های تک انرژی 200 تا 800 مگا الکترون ولت قرار گرفته بودند، شبیه­سازی انجام گرفت. نتايج شبيه­سازي تابع پاسخ سوسوزن براي نوترون­هاي تك­انرژي با نتایج تجربی ساتو و همکاران و نتایج شبیه سازی­های SCINFUL-QMD و CECIL مقایسه شده است. مقایسۀ نتایج شبیه­سـازي کد FLUKA با نتایج شبیه­سازي کد SCINFUL-QMD و نتایج اندازه­گیري شده مطابقت خوبی را نشان می­دهند.

**واژه­های کلیدی**

نوترون، تابع پاسخ، آشكارساز سوسوزن آلي، كد هسته­ای FLUKA

**مقدمه**

یکی از روش­های طیف­سنجی نوترون­های سریع براساس برهمکنش کشسان نوترون با پروتون (هسته­های هیدروژن) می­باشد. سوسوزن­های آلي بویژه سوسوزن مایع BC501A بطور گسترده­ای در اندازه­گیری توزیع انرژی نوترون­ها، به علت دارا بودن ترکیبات هیدروژن­دار، مورد استفاده قرار می­گیرند. در اين سوسوزن همچنین بخاطر اختلاف پاسخ ­زمانی به رويداد­هاي متناظر به گاما و نوترون، مي­توان با استفاده از مدار مناسب تبعیض شکل تپ، طيف نوترون را از گاما جدا نمود. ]1[

موضوع مهمی که برای اندازه­گیری طیف انرژی ، مورد توجه قرار می­گیرد ، مفهوم تابع پاسخ آشکارساز می­باشد. که در اکثر مواقع ، با تابع پاسخ بسیار پیچیده­ای روبرو هستیم. بنابراین طیف ارتفاع تپ به شدت پیچیده­ای خواهیم داشت که جهت رسیدن به طیف انرژی ذرات تابشی باید طیف ارتفاع تپ را مورد مطالعه قرار دهیم. ]2[ اندازه­گیری تابع پاسخ آشکارساز بصورت آزمایشگاهی برای هر انرژی نوترون کار بسیار مشکلی است که در برخی موارد غیر ممکن بنظر می­رسد. به همین دلیل توابع پاسخ به صورت شبیه­سازی مونت کارلو تعیین می­شوند. ]3[ یکی از پارامترهای مهم آشکارسازها در انرژی­های بالا بازدهی این آشکارسازها می­باشد .

هدف این پژوهش محاسبه تابع پاسخ نوترونی و بازدهی سوسوزنی آشکارساز سوسوزن آلی BC501A در انرژی­های بالا با استفاده از کد مونت کارلوی FLUKA می­باشد. نتايج شبيه­سازي تابع پاسخ سوسوزن براي نوترون­هاي تك­انرژي با نتایج تجربی ساتو و همکاران و نتایج شبیه سازی­های SCINFUL-QMD و CECIL مقایسه شده است.

**مطالعات شبيه­سازي**

از آنجا که نور سوسوزنی حاصل، در نتیجه برهمکنش ذرات باردار ثانویه تولیدی در سوسوزن می­باشد، پس به دنبال محاسبه انرژی بجا گذاشته شده و نور خروجی در سوسوزن هستیم. بدین منظور در کد FLUKA به ترتیب با استفاده از کارت­های EVENTBIN و TCQUENCH انرژی بجا گذاشته شده ذرات باردار تولیدی و نور خروجی برای هر تاریخچه نوترون بصورت رویداد به رویداد ثبت می­شوند. کد مونت کارلوی سه­بعدی FLUKA برای شبیه­سازی ترابرد و برهمکنش انواع ذرات با ماده بصورت وسیعی مورد استفاده قرار می­گیرد. کد FLUKA قابلیت ترابرد ذره نوترون از محدوده انرژی گرمایی تا TeV20 با دقت بالا را دارد. جزئيات شبيه‌سازي پاسخ نوترونی سوسوزن بدین صورت می­باشد که : تعاریف انرژي چشمه ، موقعيت چشمه ، هندسه و مواد توسط كد FLUKA مشخص می­شوند.

ماده مورد نظر سوسوزن آلی BC501A با هندسه استوانه­اي به قطر cm 4/12 و ارتفاع cm 7/12 که در برابر باریکه نوترون قرار داده شده است. همچنین انرژی ، موقعیت و مسیر حرکت نوترون­های تک­انرژی به ترتیب با استفاده از کارت­های BEAM و BEAMPOS مشخص می­شوند. میزان نور خروجی متناسب با این انرژی­ها در مطالعات صورت گرفته شده توسط ناکایو و همکاران ]4[ ناشی از واکنش­های (n,np) ، (n,nγ) ، (n,n3α) ، (n,α) و دوترون تولیدی می­باشد.

**نتایج**

نمودار­های شکل (1) نتایج شبیه­سازی کد FLUKA با نتایج شبیه­سازی کد CECIL ، کد SCINFUL-QMD و نتایج تجربی ساتو و همکاران ]5[ برای آشکارساز سوسوزن استوانه­ای BC501A به قطر cm4/12 و ارتفـاع cm7/12 که در معرض نوترون­هاي تک­انرژي 200 ،300 ،400 ،500 ،625 و 800 مگـا الکترون ولت قرار گرفته ارایه شده است.

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
|  |

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
| شكل (1): مقایسه توابع پاسخ شبیه­سازی شده با استفاده از کدهای FLUKA ، CECIL و SCINFUL-QMD با نتـایج تجربی براي آشکارساز سوسوزن BC501A با هندسـه اسـتوانه­اي بـه قطر cm4/12 و ارتفاع cm7/12 که در معرض نـوترون­های با انرژی­های 200 ، 300 400، 500 ، 625 و 800 مگا الکترون ولت قرار گرفته است. |

مقایسه کیفی نمودارهای توابع پاسخ تجربی و شبیه­سازی در شکل (1) نشان می­دهند ، که نتایج شبیه­سازی حاصل از کدهای FLUKA و SCINFUL-QMD همخوانی مناسب­تری را به نسبت شبیه­سازی CECIL با نتایج تجربی دارند.

|  |
| --- |
|  |
| شكل (3): مقایسه بازدهی تشخیص نوترون با استفاده از کدهای FLUKA ، CECIL و SCINFUL-QMD با نتـایج تجربی براي آشکارساز سوسوزن BC501A با هندسـه اسـتوانه­اي بـه قطر cm4/12 و ارتفاع cm7/12 که در معرض نـوترون­های با انرژی­های 200 ، 300 ، 400 ، 500 ، 625 و 800 مگا الکترون ولت قرار گرفته است. |

با توجه به اینکه سطح زیر منحنی تابع پاسخ ، بازدهی سوسوزنی را ارایه می­کند، سطح زیر منحنی توابع پاسخ تغییرات بازدهی برحسب انرژی محاسبه و نتایج حاصل در شکل (3) ارایه شده است. همانطور که در شکل (3) مشاهده می­شود ، بازدهی حاصل از نتایج شبیه­سازی کدهای FLUKA ، SCINFUL-QMD همخوانی بهتری را با نتایج تجربی دارند. این شکل نشان می­دهد که استفاده از کد CECIL در انرژی­های بالا بخاطر اختلاف زیاد نتایج با نتایج تجربی منجر به خطاهای بسیار زیاد در محاسبه بازدهی می­شود.

در جدول (1) بازدهی سوسوزنی حاصل از شبیه­سازی کد­های FLUKA ، SCINFUL-QMD و CECIL و نتایج تجربی برای آشکارساز سوسوزن BC501A بصورت کمی ارایه شده است. شکل (3) و داده­­های جدول (1) نشان می دهند که با افزایش انرژی از 200 مگا الکترون ولت تا 800 مگا الکترون ولت بازدهی سوسوزنی، برخلاف انتظار و نتایج کد CECIL ، کاهشی نیست. بازدهی در انرژی 200 مگا الکترون ولت بیشترین مقدار و در 300 مگا الکترون ولت کمترین مقدار دارد.

به منظور مقایسه کمی نتایج حاصل از شبیه­سازی با نتایج تجربی ، می­توان کمیت (ℇ) را به عنوان تفاوت نسبی بازدهی بصورت معادله (1) تعریف کرد :

|  |  |
| --- | --- |
| (1) | ℇ=|ℇEXP - ℇMODEL| / ℇEXP |

که در این معادله EXPℇ و MODEL ℇ به ترتیب بازدهی تجربی و شبیه­سازی در یک انرژی مشخص هستند. ]6[

جدول (1) : بازدهی سوسوزنی برحسب درصد برای آشکارساز سوسوزن BC501A بـه قطر cm4/12 و ارتفاع cm7/12.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| انرژی(MeV) | EXP | FLUKA | CECIL | SCINFUL-QMD |
| 200 | 719/5 | 514/6 | 864/4 | 816/5 |
| 300 | 139/4 | 342/4 | 524/2 | 161/4 |
| 400 | 551/4 | 097/5 | 025/2 | 302/4 |
| 500 | 954/4 | 053/5 | 745/1 | 948/4 |
| 625 | 213/5 | 658/4 | 401/1 | 846/4 |
| 800 | 373/5 | 025/5 | 143/1 | 094/5 |

|  |
| --- |
|  |
| شكل (4): مقایسه اختلاف نسبی بازدهی با استفاده از کدهای FLUKA ، CECIL و SCINFUL-QMD با نتـایج تجربی براي آشکارساز سوسوزن BC501A با هندسـه اسـتوانه­اي بـه قطر cm4/12 و ارتفاع cm7/12 که در معرض نـوترون­های با انرژی­های 200 ، 300 ، 400 ، 500 ، 625 و 800 مگا الکترون ولت قرار گرفته است. |

بر اساس معادله (1) ، در شکل (4) ، اختلاف نسبی بازدهی نور سوسوزنی مابین نتایج شبیه­سازی و تجربی برای کد­های FLUKA ، SCINFUL-QMD و CECIL ارایه شده است. بر اساس این شکل کمترین اختلاف بازدهی سوسوزنی با نتایج تجربی برای کدهای FLUKA و SCINFUL-QMDمی­باشد. میانگین بازدهی سوسوزنی در بازه­ی انرژی 200 تا800 مگا الکترون ولت برای نتایج تجربی 99/4 درصد است. اختلاف نسبی این مقدار با نتایج حاصل از کد FLUKA ، SCINFUL-QMD و CECIL به ترتیب 4/2 درصد، 6/2 درصد و 3/54 درصد بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده و ویژگی کد FLUKA از قبیل عدم محدویت در تعریف هندسه­ی آشکارساز و اجزای آزمایشگاه و کد با متن باز ، استفاده از کد FLUKA بجای کدهای SCINFUL-QMD و CECIL در شبیه­سازی توابع پاسخ و محاسبه بازدهی سوسوزنی در انرژی­های 200 تا 800 مگا الکترون ولت مناسب­تر است.

**نتيجه‌گيری**

با استفاده ازكارت های EVENTBIN و TCQUENCH کد FLUKA تابع پاسخ سوسوزن BC501A شبيه­سازي شده است. مقايسه نتايج شبيه­سازي حاصل از كد FLUKA با نتیجه تجربي و نتایج شبیه­سازی شده بدست آمده از کدهای SCINFUL-QMD و CECIL نشان مي­دهند كه ، كد FLUKA براي شبيه­سازي پاسخ نوتروني آشكارساز سوسوزن BC501A براي انرژي­هاي بالا مناسب مي­باشد. همچنين مي­توان از قابلیت ترابرد نور توسط کد FLUKA جهت بررسی اثرات هندسه و سطوح مختلف سوسوزن، بر تابع پاسخ سوسوزن استفاده کرد.

**منابع**

1. Brooks, F. D., & Klein, H. (2002). Neutron spectrometry—historical review and present status. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 476(1-2), 1-11.‏
2. Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.‏
3. Tajik, M., & Ghal-Eh, N. (2015). Comparison of light transport-incorporated MCNPX and FLUKA codes in generating organic scintillators responses to neutrons and gamma rays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 791, 65-68.‏
4. Nakao, N., Kurosawa, T., Nakamura, T., & Uwamino, Y. (2001). Absolute measurements of the response function of an NE213 organic liquid scintillator for the neutron energy range up to 206 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 463(1-2), 275-287.‏
5. Satoh, D., Sato, T., Endo, A., Yamaguchi, Y., Takada, M., & Ishibashi, K. (2006). Measurement of Response Functions of a Liquid Organic Scintillator for Neutrons up to 800 MeV. Journal of nuclear science and technology, 43(7), 714-719.‏
6. Pour, H. G., & Tajik, M. (2021). Analytical modeling of the neutron response function of the NE213 organic liquid scintillator in the energy range of 0.2 MeV to 148 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 995, 165088.‏