

## شبیه سازی تابع پاسخ نوترونی آشکارساز سوسوزن و افزودن قابلیت ترابرد نور به کد SCINFUL

غلامرضا اطاعتی<sup>۱\*</sup>، فریدون عباسی<sup>۲</sup>، مجید شهریاری<sup>۲</sup>، نیما قلعه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک و علوم هسته ای، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی هسته ای، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۳</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه علوم پایه دامغان

### چکیده

آشکارسازهای سوسوزن آلی  $NE-213$  (یا نوع معادل آن،  $BC-501A$ ) در طیف نگاری نوترون‌های سریع (۲۰ تا ۳۰ مگا الکترون ولت) از اهمیت ویژه ای برخوردارند. یکی از دغدغه های مهم برای طیف نگاری نوترون توابع پاسخ آشکارسازها در انرژی های مختلف نوترون فرودی می باشد. کد مونت کارلوی  $SCINFUL$  از جمله کدهای خوبی است که پاسخ سوسوزن آلی  $NE-213$  و  $NE-110$  را به نوترون‌های با انرژی ۰/۱ تا ۸۰ مگا الکترون ولت را شبیه سازی می کند. در این مقاله بخش ترابرد نور در کد  $SCINFUL$  با استفاده از کد ترابرد نور  $PHOTRACK$  تصحیح می شود. کد  $SCINFUL$  تصحیح شده همخوانی خوبی را با نتایج شبیه سازی و تجربی گروه‌های دیگر نشان می دهد. **واژه های کلیدی:**  $SCINFUL$ ،  $PHOTRACK$ ، سوسوزن  $NE213$ ، تابع پاسخ آشکارساز، ترابرد فوتون

### ۱- مقدمه

امروزه آشکارسازهای سوسوزن آلی  $NE-213$  (یا نوع معادل آن،  $BC-501A$ ) در طیف نگاری نوترون‌های سریع (۲۰ تا ۳۰ مگا الکترون ولت) از اهمیت ویژه ای برخوردارند [۱-۲]. اساس تولید نور در این سوسوزن‌ها در اثر ورود نوترون و یا تابش گاما، پس زنی هسته و یا الکترون‌های پر انرژی است. این ذرات باردار ستونی از مولکولهای یونیده و یا برانگیخته شده در مسیر خود ایجاد می کنند. سپس بخشی از این انرژی یونش و یا برانگیزش بصورت وا انگیزش فلورسانس به نور تبدیل می شوند [۳]. تابع پاسخ آشکارسازهای سوسوزن را می توان از نتایج تجربی  $Verbinski$  و همکاران [۴] و نیز شبیه سازی مونت کارلو [۵]  $O5S$ ، [۶]  $SCINFUL$ ، [۷]  $CESIL$ ، [۸]  $NRESP$  و [۸]  $NEFF$  (غیره) مورد مطالعه قرار داد. در مطالعه حاضر بدلیل کار در ناحیه انرژی کمتر از ۳۰ MeV و تطبیق نسبتاً بهتر کد  $SCINFUL$  از بین کدهای موجود این کد انتخاب شد. نتایج کد  $SCINFUL$  نشان می دهد که علیرغم نتایج خوب آن در سوسوزن‌های کوچک، عدم همخوانی محسوسی در سوسوزن‌های بزرگ مشاهده می شود. چنانچه در ادامه

\* تهران، خ انقلاب، زیر پل حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده فیزیک و علوم هسته ای یا تهران صندوق پستی ۱۵۸۷۵ - ۵۸۷۸

E-mail: r\_etaati@aut.ac.ir یا r\_etaati@yahoo.com

مشاهده می شود، اضافه کردن بخش تراپرد نور به کد SCINFUL این عدم همخوانی را تا حد بسیار خوبی کاهش داده است. یکی از مزایای تصحیحات فوق، قابلیت در نظر گرفتن رنگ آمیزی و نیز بهره کوانتومی تکثیر کننده فوتونی است که در نسخه اصلی SCINFUL این امکان وجود ندارد. همچنین اساساً وابستگی به طول موج پارامترهای اپتیکی سوسوزن از اهمیت ویژه ای برخوردار است که در نسخه تصحیح شده این امکان نیز فراهم شده است.

## ۲- کد SCINFUL

کد مونت کارلو SCINFUL، برنامه فورترنی است که پاسخ سوسوزن آلی NE-213 را به نوترون‌های با انرژی ۰/۱ تا ۸۰ مگا الکترون ولت را شبیه سازی می کند [۶]. این کد با در نظر گرفتن هندسه استوانه‌ای برای سوسوزن در مختصات دکارتی می تواند سینماتیک ذرات (نظیر مکان رخداد واکنش، انرژی و جهت حرکت ذرات ثانویه و نظایر این‌ها) را شبیه سازی کند. این کد ۳۹ کانال واکنش مختلف را برای نوترون در نظر می گیرد که این خود یکی از برتری های منحصر بفرد این کد نسبت به کدهای مشابه مانند [V]CECIL می باشد. کد SCINFUL دارای ویژگی های زیر می باشد:

(الف) نوترون‌ها از یک چشمه نقطه‌ای خارج می شوند نه بصورت یک باریکه نوترونی نظیر آنچه در کد O5S [۵] در نظر گرفته می شود. چشمه نقطه ای را می توان در هر نقطه‌ای در نظر گرفت (حتی در داخل آشکارساز). (ب) یک موازی ساز (کولیماتور) فرضی را می توان در وجه مقابل چشمه از آشکارساز در نظر گرفت. (ج) علاوه بر چشمه تک انرژی می توان دو توزیع (۱) یکنواخت و (۲) ماکسولی را برای نوترون‌ها در نظر گرفت. (د) در مورد سوسوزن NE-213، مانند خاصیت "جداسازی شکل پالس" می توان محاسبات مربوط به تراپرد گاماها حاصل از واکنش‌های نوترونی را در نظر گرفت. (ه) می توان با استفاده از زیر برنامه PHOTON در کد SCINFUL پاسخ سوسوزن به تابش گاما را بدست آورد.

علیرغم ویژگی‌های مهم و مفید ذکر شده در بالا، کد SCINFUL تنها کاری که در مورد تراپرد نور سوسوزنی انجام می دهد این است که به عنوان یک تقریب مرتبه اول از تضعیف نور رسیده به فوتوکاتد را بصورت خیلی ساده انجام می دهد. در این تقریب فاصله نقطه تولید نور تا مرکز PM را محاسبه کرده و این مقدار را در توان تابع نمایی نزولی مربوط به تضعیف نور قرار می دهد. هدف اصلی از این مطالعه تصحیح این بخش از شبیه سازی تراپرد نور در کد می باشد.

## ۳- کد PHOTRACK

کد PHOTRACK، تراپرد نور در آشکارسازهای سوسوزن را از نقطه تولید نور تا لحظه تولید فوتوالکترون در تکثیر کننده فوتونی شبیه سازی می کند [۹]. در نسخه اخیر کد PHOTRACK وابستگی به

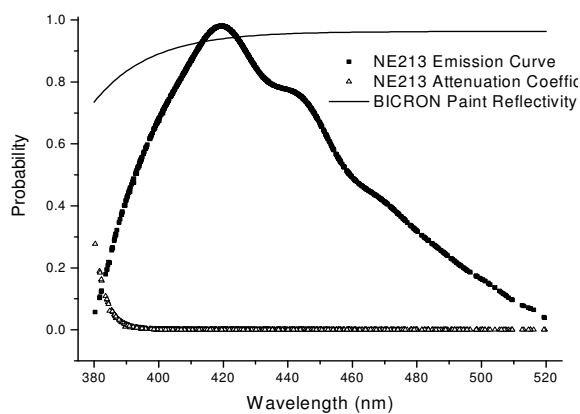
طول موج پارامترهای اپتیکی نیز در نظر گرفته شده که همخوانی خوبی را با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهد [۱۰].

در کدهای ترابرد نور [۹] PHOTRACK، [۱۱] OPTICS، [۱۲] LITRANI و نظایر این) شبیه سازی بر پایه اپتیک هندسی است که بر این اساس اطلاعات مفیدی از جمله بهره جمع آوری نور، قدرت تفکیک ارتفاع پالس و زمان، تعداد برخوردهای فوتون با دیواره سوسوزن و نظایر این از آن استخراج می‌شود. فرض‌هایی که در این شبیه سازی در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از:

(۱) نقاط تولید فوتون (که بصورت کاملاً کاتوره‌ای در حجم حساس سوسوزن تولید می‌شوند) و جهت‌های حرکت فوتون (که بصورت کاتوره‌ای در فضا تولید می‌شوند) (۲) تضعیف نور (که از تابع نمایی مرتبه اول تبعیت می‌کند) (۳) برخورد با دیواره سوسوزن (یا نوربر) (۴) انعکاس و یا عبور از دیواره سوسوزن یا نوربر (۵) آشکارسازی (که به معنی ثبت فوتون‌ها در پنجره PM است).

از آنجایی که نور تولید شده در سوسوزن دارای طول موجی است که از منحنی گسیل بدست می‌آید (یعنی همه طول موج‌ها مساوی الاحتمال نیستند)، برای داشتن یک کد ترابرد نور واقعی باید همه وابستگی‌ها به طول موج در پارامترهای اپتیکی در نظر گرفته شوند. معمولاً موارد زیر به عنوان وابستگی به طول موج یک کد ترابرد در سوسوزن اعمال می‌شود:

(۱) یک طول موج به فوتون تولید شده وابسته می‌شود که از منحنی گسیل بدست می‌آید [۱۳]. (۲) تغییرات ضریب انعکاس رنگ بصورت تابعی از طول موج در نظر گرفته می‌شود. (۳) به هنگام محاسبه ضریب انعکاس از سطوح بدون رنگ، وابستگی به طول موج ضریب شکست محاسبه شود. (۴) ضریب تضعیف نور سوسوزن بصورت تابعی از طول موج در نظر گرفته می‌شود. (۵) بهره کوانتومی PM بصورت تابعی از طول



شکل ۱. وابستگی به طول موج در نور سوسوزن (NE-213)، ضریب تضعیف (NE-213) و ضریب انعکاس رنگ (BICRON) که در شبیه سازی مونت کارلو ترابرد نور استفاده شده است.

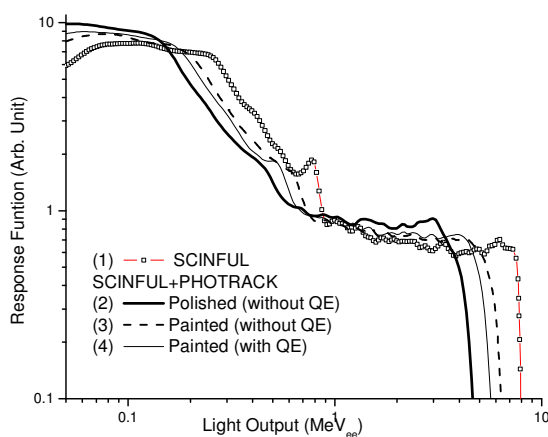
موج در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. (۶) نایکنواختی سطح فوتوکاتد که در PM های بزرگ معمولاً خودنمایی می‌کند باید در نظر گرفته شود [۱۴]. موارد ۱، ۲، ۴ و ۵ که از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند در کد PHOTRACK در نظر گرفته شد و نتایج ارائه گردید [۱۰]. داده‌های مربوط به وابستگی به طول موج پارامترهای اپتیکی در شکل ۱ آمده است. منحنی مربوط به ضریب جذب با استفاده از منحنی گسیل و جذب سوسوزن و محاسبات مونت کارلو بدست آمده است.

#### ۴- کد تلفیق SCINFUL-PHOTRACK

همانطور که در بخش ۳ اشاره شد، کد PHOTRACK به عنوان مسئول ترابرد نور در کد تلفیقی عمل می‌کند. به این منظور کد SCINFUL به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و فلوچارت و پارامترهای اساس این کد استخراج گردید. نقاط تولید فوتون و انرژی ذخیره شده توسط ذرات مختلف در هر مرحله از کد SCINFUL به عنوان ورودی به زیر روال PHOTRACK فرستاده می‌شوند. سپس فوتون مرئی توسط PHOTRACK تعقیب و وزن نهایی فوتون پس از مراحل توضیح داده شده در بخش ۳ به عنوان نور خروجی به برنامه SCINFUL بازگردانده شد.

منحنی نوری پروتون استفاده شده در نسخه تصحیح شده کد SCINFUL در حقیقت یک منحنی برازش شده به داده های گرین و همکاران [۱۵] است که برازش رابطه ارائه شده بوسیله سسیل [۷] بر روی نقاط تجربی بدست آمده است. برای مقایسه نتایج SCINFUL با داده های تجربی، اثر قدرت تفکیک آشکارسازی بروی نتایج خروجی شبیه سازی (که به عنوان یک زیرروال اضافی در کد SCINFUL تصحیح شده قرار گرفته است) در نظر گرفته شد و برای اعمال وابستگی قدرت تفکیک به انرژی از اندازه گیری های گرین و همکاران [۱۵] استفاده شد.

بهره کوانتومی فوتوکاتی که با سوسوزن NE213 استفاده می‌شود می‌تواند تابع پاسخ سوسوزن را بخاطر وابستگی به طول موجش تغییر دهد (به شکل ۴ مرجع [۱۰] که مربوط به تکثیر کننده فوتونی R580-17 HAMAMATSU است رجوع شود). بدلیل اینکه هدف بررسی تاثیر وابستگی QE به طول موج و میزان اثر آن بر روی تابع پاسخ می‌باشد، منحنی QE پس بهنجار کردن بیشینه آن به ۱ در کد استفاده شده است.



در شکل ۲ تغییرات تابع پاسخ قبل و پس از اعمال ترابرد فوتون، نسبت به پارامترهایی اپتیکی که وابسته به طول موج می‌باشند، نشان داده شده است.

نتایج زیر را می‌توان از شکل ۲ استخراج نمود:

۱- با تصحیح بخش ترابرد نور کد SCINFUL،

یعنی مورد ۲ در شکل ۲ (سوسوزن پولیش

شده بدون QE) در قیاس با مورد ۱ (نسخه

اصلی SCINFUL) بخاطر مقدار نور خروجی

از دیواره و نیز تضعیف نور در حین ترابرد

نور کمتری ثبت شده است که این باعث

جمع شدگی تابع پاسخ شده است.

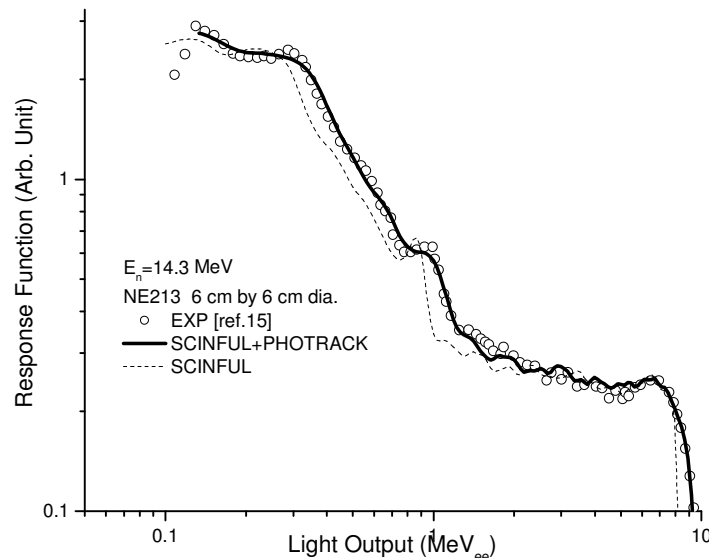
شکل ۲. اثر وابستگی به طول موج بهره کوانتومی فوتوکاتد استفاده شده با سوسوزن NE213 (۶cm) برای نوترون‌های ۱.۴/۳MeV.

۲- رنگ آمیزی سلول سوسوزن (یعنی مورد ۳) باعث شده است که نور کمتری از دیواره خارج شود و در عین حال تعداد برخوردها را با دیواره کمتر کرده است [۱۰] که این باعث شده قدرت تفکیک آشکارسازی و بهره جمع آوری نور نسبت به مورد ۲ بهبود یافته است.

۳- مقایسه مورد ۱ با موارد ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که اعمال ترابرد نور، قدرت تفکیک را کاهش داده است که علت آن این است که در نسخه اصلی SCINFUL تنها قدرت تفکیک ذاتی در نظر گرفته شده و عملاً قدرت تفکیک اضافی ناشی از ترابرد نور در نظر گرفته نمی‌شود.

۴- شبیه سازی وابستگی به طول موج QE، قدرت تفکیک را کاهش داده است. پهن شدگی تابع پاسخ ناشی از ترابرد نور به خوبی در ناحیه  $0.52 \text{ MeV} \leq E \leq 1.2 \text{ MeV}$  (قله  $^{12}\text{C}(n, \alpha)$ ) قابل مشاهده است. همچنین مقایسه این نقطه نشان می‌دهد که رنگ آمیزی، قدرت تفکیک را بهتر می‌کند.

برای اینکه اهمیت تصحیح پیشنهادی این مقاله را نشان دهیم، در شکل ۳ نتایج کد SCINFUL و CINFUL+PHOTRACK را با داده های تجربی مرجع [۱۵] برای نوترون‌های  $14.3 \text{ MeV}$  که در واکنش  $T(d, n)\alpha$  تولید شده و با تکنیک ذره همراه اندازه گیری شده اند نشان داده‌ایم. برای نرمال کردن و مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی انتهای تابع پاسخ که مربوط به پروتون‌ها می‌باشد را بروی هم منطبق کرده ایم. زیرا دقت سطح مقاطع اندازه گری شده برای واکنش پس‌زنی پروتون بسیار زیاد می‌باشد و داده ها در این ناحیه از دقت بسیار بالایی برخوردارند.



شکل ۳. مقایسه توابع پاسخ کد تلفیقی SCINFUL+PHOTRACK با نتایج تجربی و شبیه سازی (نسخه اصلی SCINFUL) برای سوسوزن NE213 با اندازه ۶cm برای نوترون‌های  $14.3 \text{ MeV}$ .

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق سوسوزن NE213 با استفاده از نسخه تصحیح شده کد SCINFUL تولید شده است که در این تصحیح، ترابرد نور سوسوزن با استفاده از کد PHOTRACK به دقت شبیه سازی شده است. مقایسه با نتایج شبیه سازی و تجربی نشان می دهد این تصحیح به کیفیت شبیه سازی کد کمک کرده است.

## ۷- مراجع

- [1] F. Abbasi Davani, R. Koochi-Fayegh, H. Afarideh, G. R. Etaati, G. R. Aslani, Design, calibration and testing of the NRCAM fast neutron spectrometry system, Rad. Meas. 37 (2003) 237-245.
- [2] F. Abbasi Davani, G. R. Etaati, H. Afarideh, R. Koochi-Fayegh, G. R. Aslani, Neutron Spectrum Measurement in D+Be Reaction, Iranian J. of Phys. Res., 3, No.2 (2002) 101-107.
- [3] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurements, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, New York, 2000.
- [4] V. V. Verbinski, W. R. Burrus, T. A. Love, W. Zobel, N. W. Hill, R. Textor, Calibration of an organic scintillator for neutron spectrometer, Nucl. Instr. and Meth. 65 (1968) 8-25.
- [5] R. E. Textor, V. V. Verbinski, O5S: A Monte Carlo code for calculating the pulse-height distributions due to mono-energetic neutrons on organic scintillators. Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4160 (1968).
- [6] J. K. Dickens, SCINFUL: A Monte Carlo based computer program to determine a scintillator full energy response to neutron detection for En between 0.1 and 80 MeV. Part 1: User's manual and FORTRAN program listing, Report ORNL-6462, Oak Ridge. 1988. Part 2: Program development and comparisons of program predictions with experimental data, Report ORNL-6463, Oak Ridge, 1988.
- [7] R. A. Cecil, B. D. Anderson, R. Madey, Improved predictions of neutron detection efficiency for hydrocarbon scintillators from 1 MeV to about 300 MeV, Nucl. Instr. and Meth. 161 (1979) 439-447.
- [8] G. Dietze, H. Klein, Program codes NRESP7 and NEFF7, PTB Braunschweig, Report PTB-ND-22, 1982.
- [9] N. Ghal-Eh, M. C. Scott, R. Koochi-Fayegh, M. F. Rahimi, A photon transport model code for use in scintillation detectors, Nucl. Instr. and Meth. A516 (2004) 116-121.
- [10] N. Ghal-Eh, R. Koochi-Fayegh, Light collection behaviour of scintillators with different surface coverings, Radiat. Meas., 41 (2006) 289-294.
- [11] E. Frlez, B. K. Wright, D. Poranic, Optics: a general purpose scintillator light response simulation code. Comput. Phys. Commun. 134 (2000) 110-135.
- [12] F. Gentit, Litrani: a general purpose Monte Carlo program simulating light propagation in isotropic or anisotropic media, Nucl. Instr. and Meth. A486 (2002) 35-39.
- [13] BICRON catalogue <http://www.bicron.com>.
- [14] HAMAMATSU Inc. Photomultipliers Data Sheets <http://www.hamamatsu.com>.
- [15] S. Green, M. C. Scott, R. Koochi-Fayegh, A user guide for the NPL NE213 neutron spectroscopy system, School of Physics and Astronomy, The University of Birmingham, UK (1991).