ارزیابی و آزمایشات تجربی با سوسوزن پلاستیک برای ضخامت سنجی بتا

کاتبی،فاطمه [۱]– قلی‌پور پیوندی،رضا*[۲] – رحمانی‌فرد،روح الله[۱]

دانشگاه علم وصنعت ایران تهران، دانشکده فناوری های نوین، گروه فیزیک هسته ای.

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک ومهندسی هسته ای، گروه فیزیک هسته ای.

چکیده:

ضخامت‌سنجی بتا کاربرد بسیار گسترده در صنایع مختلف دارد و این عمل مستلزم دقت بالا برای تعیین ضخامت‌های بسیار پایین است. بدین منظور، در این مقاله آشکارساز سوسوزن پلاستیک (BC400) برای ضخامت‌سنجی بتا مورد استفاده قرار گرفت. ضخامت بهینه سوسوزن پلاستیک برای آشکارسازی ذرات بتا و نیز میزان قدرت تفکیک آشکار ساز سوسوزن پلاستیک برای تفکیک ضخامت ورقه نازک BOPP، از روش محاسبه با کد MCNP4C وهمچنین اندازه گیری تجربی بررسی و تعیین گردید. که ضخامت ٤٥٤/٠٦ میکرومتر ضخامت بهینه سوسوزن پلاستیک مورد استفاده در ضخامت‌سنج بتا و قدرت تفکیک آشکارساز سوسوزن پلاستیک جهت تفکیک ضخامت ورقه BOPP تا ضخامت ۰/۱ میکرومتر، معادل با دقت۰/۵± ٪ به دست آمد.

کلمات کلیدی: *سوسوزن پلاستیک نازک، آشکارساز وذرات بتا*

مقدمه:

تاریخ طراحی و ساخت اولین سیستم ضخامت‌سنج بتا، به دهه ۱۹۵۰ میلادی مربوط می‌شود[۱] و [۲]. در آن زمان از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برای ضخامت‌سنجی در صنعت استفاده می‌شده است[۱]. ضخامت-سنج‌های بتا به طور گسترده‌ای در صنعت پلاستیک‌سازی، تولیدکاغذ، تولید ورق‌های فلزی و پلاستیکی و نیز در پایش پیوسته جرم سطحی بدون تماس در ورقه‌های شیشه‌ای، پارچه، ورقه‌های الیاف و غیره کاربرد دارند. در ضخامت‌سنج‌های بتا آشکارساز گازی بیشتر مورد استفاده هستند. در این مقاله قصد داریم از سوسوزن های پلاستیک در ضخامت‌سنجی بتا استفاده کنیم. سوسوزن‌های پلاستیک در فیزیک هسته‌ای، تجزیه وتحلیل مواد و استفاده در راکتورهای نسل جدید حائز اهمیت است[۳]. علاوه بر این، این سوسوزن‌ها در آزمایش-های علمی و اندازه‌گیری‌های فنی از قبیل تعیین ضخامت، تعیین ارتفاع سطح مایعات وموادی از این دست استفاده شایانی دارند. شمارش ذرات بتا توسط شمارنده سوسوزن پلاستیک یک روش مناسب برای تعیین نرخ دوز بتایی که به طور طبیعی در مواد رادیواکتویته موجود در خاک است. ولی موضوع حائز اهمیت این است که آیا یک ضخامت بهینه از سوسوزن پلاستیک، وجود دارد که برای دزیمتری بتا مناسب باشد. برای

این منظور و در جهت یافتن یک ضخامت بهینه برای سوسوزن پلاستیک R.B.Galloway و همکارانش آشکارساز سوسوزن پلاستیک NE102A را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری برای ٤ ضخامت مختلف انجام و وابستگی میزان شمارش به میزان دز، نسبت به انرژی آستانه بررسی شد. مطابق با نتایج، اندازه بهینه سوسوزن پلاستیک ٦ میلی‌متراست[٤]. در پژوهشی که توسط A.kumar و همکارانش انجام شد، مجموعه‌ای از یک سوسوزن نوع EJ-212 (BC400) به همراه لوله فوتومولتی پلایر کوچک، به منظور بررسی اثر افزایش ضخامت سوسوزن پلاستیک بر روی سیستم شمارش گردآوری شد. اندازه‌گیری با چشمه‌های گاما وذرات بتای چشمه نیکل-٦٣ و شبیه‌سازی باmcnp-4a به منظور بررسی شمارش تعداد ذرات بتا با حداکثر انرژی ١٨/٦keV برای ضخامت سوسوزن در بازه ١٠ میکرومتر تا ٢٥٠٠ میکرومتر موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای چشمه گاما با افزایش ضخامت سوسوزن، افزایش در شمارش مشاهده شد ولی برای ذرات بتا افزایش اولیه از شمارش با افزایش ضخامت و به دنبال آن با افزایش بیشتر ضخامت، کاهش در شمارش مشاهده شد[٥]. موضوع دیگری که مطرح می شود این است که قدرت تشخیص وتفکیک ضخامت یک ورقه نازک با استفاده از آشکارساز سوسوزن پلاستیک مورد استفاده در ضخامت‌سنج‌های بتا تا چه ضخامتی است. که با توجه به موارد ذکرشده، دراین مقاله به‌دست آوردن ضخامت بهینه سوسوزن پلاستیک نوع BC400 به عنوان آشکارساز مورد استفاده درضخامت‌سنج‌های بتا و دقت قدرت تفکیک ضخامت ورقه نازک BOPP[١] توسط سوسوزن پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است.

روش کار:

در این پژوهش چشمه بتازای خالص پرومتیوم-١٤٧ و سوسوزن پلاستیک BC400 در اندازه‌گیری تجربی و نیز محاسبه شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. به برخی از ویژگی‌های سوسوزن پلاستیک BC400 و چشمه در جدول (١) و(٢) اشاره شده است. برای بخش اندازه‌گیری میزان قدرت تفکیک وتشخیص ضخامت توسط آشکارساز سوسوزن پلاستیک، نیز از یک ورقه BOPP استفاده شده است.

جدول (١) ویژگی‌های سوسوزن پلاستیک *BC-400* [٦]

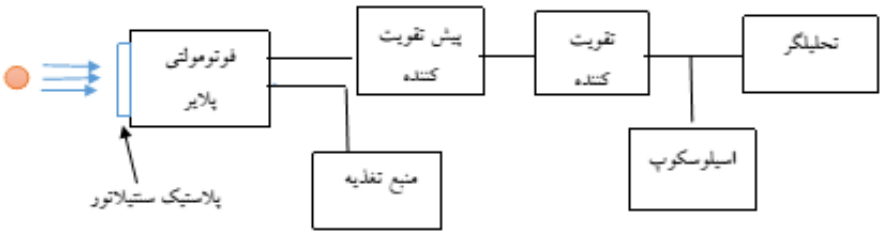
ردیف	نور خروجی (درصد آنتراسن)	ضریب شکست	طول میرایی نور (cm)	طول موج گسیلی (nm)	زمان پاسخ (ns)	بازده نور Photon/MeV
١	٦٥	١/٥٨	١٦٠	٤٢٠	٢/٤	١٠٠٠٠

[١] Biaxially Oriented Polypropylene

جدول (۲) مشخصات چشمه[۱]

ردیف	چشمه	نیمه عمر(سال)	بیشینه انرژی (MeV)	میانگین بیشینه انرژی (MeV)
۱	پرومتیوم-۱٤۷	۲/٦	۰/۲۲٤	۰/۰٦٦

برای اندازه‌گیری طیف بتای پرومتیوم-۱٤۷، چیدمان سیستم آشکارساز، چشمه و فوتومولتی‌پلایر CR-169 مطابق شکل (۱) است. برای کاهش تأثیر نور بازتاب شده از سوسوزن، از آلومینیوم جهت پوشش دور سوسوزن استفاده شد. همچنین در هنگام اندازه‌گیری طیف، بین سوسوزن‌های پلاستیک و پنجره ورودی فوتومولتی‌پلایر از ژل سیلیکا استفاده شد. این ژل برای کاهش میزان فوتون‌های نوری عبوری مرز بین نمونه و فوتو مولتی‌پلایر به کار می رود.



شکل (۱) چیدمان اندازه‌گیری طیف بتا برای ضخامت‌های مختلف سوسوزن پلاستیک BC-400

در بخش شبیه‌سازی از یک آشکارساز سوسوزن پلاستیک استوانه‌ای BC400 به شعاع ۲/۵ سانتی‌متر و ضخامت‌های ۱۷۷، ۳۳۵ و ٤۵۰ میکرومتر جهت اندازه‌گیری طیف استفاده شد. درشبیه‌سازی‌هایی که مربوط به محاسبه تالی F8 جهت به دست آوردن شکل طیف است از یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد درون یک غلاف احاطه‌کننده تنگستن با چگالی $19/253\ gr/cm^3$ (دقیقا مطابق با یک سیستم واقعی) استفاده شد. همچنین مطابق با روش تجربی، آشکارساز سوسوزن پلاستیک در فاصله‌ی ۵/۹ سانتی‌متر از چشمه رادیواکتیو در نظر گرفته شد. محیط اطراف سیستم هوا با چگالی ۰/۰۰۱۲۵ گرم برسانتی‌مترمکعب است تا شرایط شبیه-سازی به شرایط واقعی نزدیک باشد. در کارت داده‌ها برای تعریف بخش طیف انرژی erg باید این نکته را درنظرگرفت، از آنجایی که ذرات بتا تک انرژی نبوده و به‌صورت یک طیف می‌باشند. برای مدل کردن طیف انرژی بتای گسیلی چشمه پرومتیوم-۱٤۷ در کد، از کارت‌های si و sp برای کارت انرژی استفاده شده است. که با استفاده از یک طیف مرجع برای چشمه پرومتیوم-۱٤۷ [۱] و نرم‌افزار plot-digitezer با تقسیم‌بندی انرژی به بازه‌های کوچک و در نظر گرفتن احتمال نسبی واپاشی در هر بازه انرژی، طیف بتا مدل‌سازی شده است. مقدار تالی F*8 را برای این سلول‌ها مورد بررسی قرار دادیم. و میزان فوتون نور خروجی را با رابطه

معادله (۱) $I=I_0\times\exp(-\mu\times x)$

به دست آوردیم. در این رابطه برای مقدار I_0 ابتدا مقادیری که از تالی F*8 از شبیه‌سازی به دست آوردیم را درمقدار ۱۰۰۰۰ ضرب کرده و برای μ، مقدار $^{-1}$۰/۰۰۶۲۵cm نوشته‌شده است. مقدار۰/۰۰۰۶۲۵ از تقسیم ۱ بر مقدار۱۶۰سانتی‌متر که طول میرایی نور در سوسوزن پلاستیک است، محاسبه شده است. برای مقدار x نیز فاصله‌ای که فوتون در مقابل خود می بیند، لحاظ شده است. برای محاسبه قدرت تفکیک آشکارساز، ابتدا میزان حساسیت برای ضخامت‌های ۲۰ ، ۲٤ ، ۲۵ ، ۲۷، ۳۰ و ٤۰ میکرومتر با کد محاسباتی mcnp4c انجام شد. این ضخامت ها از این جهت انتخاب شدند که ضخامت‌های ورقه در اندازه‌گیری تجربی نیز همین ضخامت‌ها بوده است. سپس به منظور بررسی تشخیص میزان حساسیت چشمه پرومتوم-۱٤۷ به ازای تغییرات ۰/۱ میکرومتر از ضخامت ورقه، ابتدا شمارش ذرات در آشکارساز به ازای ضخامت ۲۰ میکرومتر ثبت شد. سپس به ازای افزایش ضخامت ۰/۱ میکرومتر دوباره شمارش‌ها، این‌بار به ازای ضخامت‌های ۲۰/۱، ۲۰/۲، ۲۰/۳، ۲۰/٤، ۲۰/۵، ۲۰/٦، ۲۰/۷، ۲۰/۸ و۲۰/۹ میکرومتر ثبت شدند. در ادامه برای تعیین قدرت تفکیک، معیار ریلی[۲]، که حداقل اختلاف بین دو توزیع شمارش برای اینکه آن‌ها از هم قابل تفکیک باشند [۷] محاسبه شد. اگر اختلاف بین این دو توزیع از این معیار کمتر باشد نمی‌توان آن‌ها را از هم تفکیک نمود. معیار ریلی برای دو توزیع شمارش به صورت زیر تعریف می شود. با فرض اینکه شمارش‌های ثبت شده از تابع توزیع گاوسی پیروی می‌کند. FWHM، پهنا در نیم بیشینه شمارش‌های ثبت شده است. همچنین FWHM، ۲/۳۵ برابر مقدار انحراف معیار (σ) است. اگر مقدار شمارش‌های به دست آمده از تالی F8 را با M نشان دهیم، انحراف معیار (σ) حاصلضرب M در مقدارخطای نسبی به دست آمده در شبیه‌سازی‌ها قابل محاسبه است. اگر مقدار شمارش‌های ثبت شده در آشکارساز را برای دو ضخامت با اختلاف ۰/۱ میکروموترا با M_1 , M_2 نشان بدهیم.

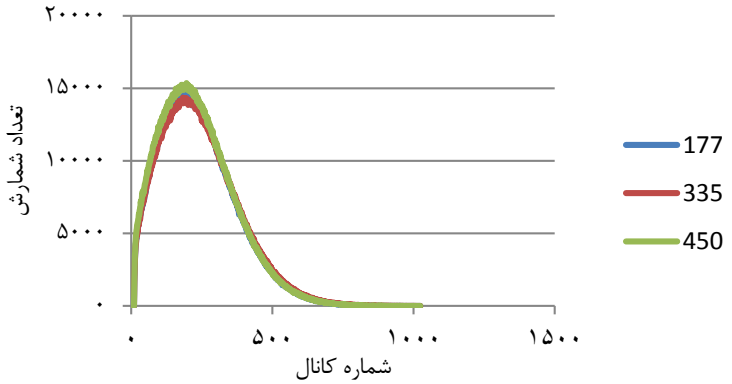
معادله (۲) $M_1-M_2> 2.35\times(\sigma)$

نتایج:

ضخامت بهینه ضخامتی که میزان فوتون نور خروجی در آن بیشینه است. در محاسبات ابتدا با افزایش ضخامت سوسوزن پلاستیک، میزان فوتون نوری خروجی رفته‌رفته افزایش یافت و پس از رسیدن به مقدار بیشینه این مقدار رو به کاهش رفت. برای چشمه پرومتیوم-۱٤۷ بیشینه تعداد فوتون نور خروجی برابر با

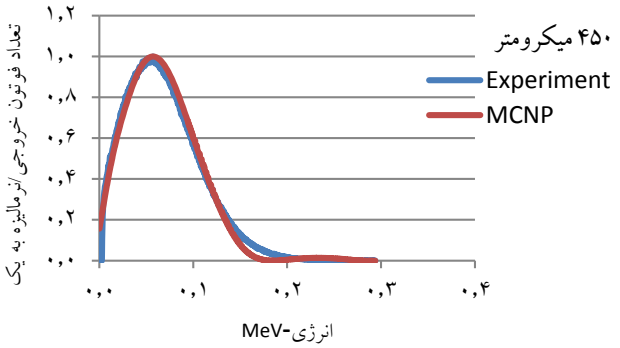
[۲] Rayleigh's criterion

۳۷۵/۵۵۱ فوتون در هر مگا الکترون ولت و در ضخامت ٤٥٤/٠٦ میکرومتر است. از طرفی اندازه‌گیری طیف پرومتیوم-۱٤۷ بتازا برای ۳ ضخامت مختلف ۱۷۷، ۳۳۵ و ٤٥٠ میکرومتر از سوسوزن پلاستیک BC400 که به صورتی تجربی به دست آمدکه در شکل (۲) نتیجه اندازه‌گیری نشان داده شده است.



شکل(۲) اندازه‌گیری طیف تجربی پرومتیوم-۱٤۷ برای ضخامت‌های ۱۷۷، ۳۳۵ و ٤٥٠ میکرومتر

سپس ضریب‌همبستگی حاصل از هر دو داده جهت مقایسه نتایج حاصل از روش تجربی وکد محاسباتی جهت اعتبار سنجی داده‌ها محاسبه شد. در نتیجه ضریب‌همبستگی مقداری بالای ۹۸ درصد را نشان می داد. درشکل(۳) نتیجه طیف حاصل از اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی برای سوسوزن پلاستیک با ضخامت ٤٥٠میکرومتر نشان داده شده است.



شکل(۳) مطابقت طیف اندازه گیری تجربی و محاسبه با کدMCNP4C

در بررسی تشخیص میزان حساسیت و دقت اندازه‌گیری تغییر ضخامت ورقه BOPP که برای ضخامت‌های تجربی با کد محاسباتی MCNP4C محاسبه شد. داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری تجربی و محاسبه با شبیه‌سازی به مقدار یک نرمالیزه شدند، و ضریب همبستگی بین هر دو اندازه‌گیری، محاسبه شد که مقدار ۹۹/۷۵ درصد را نشان می داد. در نتیجه شمارش حاصل از اندازه‌گیری تجربی ومحاسبه از طریق کد مطابقت مناسبی را نشان داد. پس از اعتبارسنجی محاسبات شبیه‌سازی در ادامه با استفاده ازهمین کد محاسباتی استفاده شده در مرحله قبل، برای محاسبه میزان حساسیت به ازای تغییر۰/۱ از ضخامت ورقه حول ضخامت

۲۰ میکرومتر، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج موجود در جدول (۳) و معادله (۲) مشاهده می شود قدرت تفکیک ضخامت ورقه با چشمه بتازای پرومتیوم-۱٤۷ برای ضخامت بهینه سوسوزن پلاستیک برابر با دقت ۰/۵ ± ٪ است.

جدول (۳) محاسبه قدرت میزان تفکیک ضخامت ورقه با استفاده از داده‌های کد MCNP-4C

ردیف	ضخامت(میکرومتر)	2.35×(σ)	M_1-M_2
۱	۲۰/۱	۲/۰۲٦۰۵E-۰۵	۷/٦۷E-۰٦
۲	۲۰/۲	۲/۰۳۱۱۱E-۰۵	۱/۷۵۸E-۰۵
۳	۲۰/۳	۲/۰۳٦۱٦E-۰۵	۲/۷E-۰۵
٤	۲۰/٤	۲/۰٤۱۲۱E-۰۵	۲/۱۱۷E-۰۵
۵	۲۰/۵	۲/۰٤٦۲٦E-۰۵	۳/۰٤E-۰۵
٦	۲۰/٦	۲/۰۵۱۳۲E-۰۵	۲/۹۰٤E-۰۵
۷	۲۰/۷	۲/۰۵٦۳۷E-۰۵	۳/۳۳۱E-۰۵
۸	۲۰/۸	۲/۰٦۱٤۲E-۰۵	۵/۱۹٦E-۰۵
۹	۲۰/۹	۲/۰٦٦٤۷E-۰۵	۵/۹۸۲E-۰۵

بحث و نتیجه‌گیری:

در این مقاله که به بررسی استفاده از سوسوزن پلاستیک نوع BC400 در ضخامت‌سنج‌های بتا پرداخته شده است. ضخامت بهینه سوسوزن پلاستیک با چشمه پرومتیوم-۱٤۷ موردبررسی قرارگرفت که ضخامت ٤۵٤/۰٦ میکرومتر ضخامت بهینه به‌دست آمد. سپس میزان قدرت تفکیک آشکارساز سوسوزن پلاستیک برای یک ورقه BOPP موردبررسی قرارگرفت. طبق نتایج تا ضخامت ۰/۱ میکرومتر از ورقه نازک را می‌توان توسط سوسوزن‌های پلاستیک نازک تشخیص داد با وجود قدرت تفکیکی با دقت ۰/۵± ٪ سوسوزن پلاستیک در کارهای آینده با بهینه کردن شرایط اندازه‌گیری می‌توان این ضخامت را کاهش داده و بهبود بخشید.

مراجع:

[۱] Cross, W., H. Ing, and N. Freedman, *A short atlas of beta-ray spectra*. Physics in Medicine and Biology, **28**(11): p. 1251,1983.

[۲] Fearnside, K., *Beta-ray thickness gauges for industrial uses.* Radio Engineers, Journal of the British Institution of, **11**(9) :p. 361-366,1951.

[۳] Quaranta, A., et al., *Characterization of polysiloxane organic scintillators produced with different phenyl containing blends.* Materials Chemistry and Physics, **137**(3): p. 951-958,2013.

[۴] Galloway, R., *Optimum scintillator thickness for beta dosimetry.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **93**(1): p. 93-97,1994.

[۵] Kumar, A. and A. Waker, *An experimental study of the relative response of plastic scintillators to photons and beta particles.* Radiation Measurements, **47**(10): p. 930-935,2012.

[۶] Pywell, R., et al., *Photon flux monitor for a mono-energetic gamma ray source.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **606**(3): p. 517-522,2009.

[۷] Ram, S., E.S. Ward, and R.J. Ober, *Beyond Rayleigh's criterion: a resolution measure with application to single-molecule microscopy.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, **103**(12): p. 4457-4462,2006.