



ساخت آشکارساز حبابی نوترون (نمونه اولیه)

پیمان رضائیان^۱ - غلامرضا رئیس علی^{۱*} - اعظم اخوان^۱ - علی اکبر کاظمی^۲

۱- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، امور حفاظت در برابر اشعه

چکیده

در این مقاله علاوه بر شبیه سازی پاسخ آشکارسازهای حبابی، نمونه اولیه آشکارساز ساخته شده در پژوهشکده کاربرد پرتوهای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران ارائه شده است. آشکارساز حبابی ساخته شده توزیع یکسانی از قطرات فوق گرم از جنس فریون-۱۲ درون یک محیط پلیمری می‌باشد. برای ساخت این آشکارساز از تکنیک پلیمریزاسیون در جا استفاده شده است. پرتوهای این آشکارسازها با نوترون سبب ایجاد حباب‌هایی قابل رویت با چشم غیر مسلح می‌شود که تعداد این حباب‌ها متناسب با میزان دز جذبی دریافتی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی بدست آمده همخوانی خوبی دارند.

کلید واژه: آشکارسازی نوترون، آشکارساز حبابی، قطره فوق گرم، محیط پلیمری

۱- مقدمه

از زمان اکتشاف نوترون در سال ۱۹۳۲ تا به امروز آشکارسازی و بیناب‌نمایی نوترون یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی فیزیکدانان هسته‌ای بوده است. نوترون ذره‌ای بدون بار است از این رو فاقد هرگونه برهمکنش کولنی با محیط اطراف است. فاقد بار بودن این ذره آشکارسازی آن را با دشواری‌هایی مواجه می‌سازد. آشکارساز-های حبابی [۱] یکی از ابزارهای آشکارساز نوترونی و نسل جدید آشکارسازهای اتاقک حباب هستند [۲]. آشکارسازهای حبابی قطراتی از یک مایع فوق گرم هستند که درون یک محیط میزبان قرار گرفته‌اند. برهمکنش نوترون با قطرات فوق گرم سبب تشکیل حباب‌هایی با ابعادی در حدود ۰/۵ میلیمتر می‌شود که این حباب‌ها با چشم غیر مسلح قابل رویت هستند. محیط میزبان این آشکارسازها می‌تواند از جنس گلیسرین [۱]، یا پلیمر [۳] باشد و عموماً از گازهای فریونی به عنوان مایع فوق گرم (مایع حساس) استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این آشکارسازها می‌توان به عدم حساسیت به پرتوهای گاما، قابلیت قرائت مستقیم، قابلیت عملکرد فعال و غیر فعال، ترکیب معادل بافت، اندازه کوچک، عدم نیاز به منبع تغذیه و قیمت ارزان آن‌ها اشاره کرد [۴]. این ویژگی‌ها سبب شده است که امروزه این آشکارسازها در زمینه‌های وسیعی از جمله دزیمتری [۵]، بیناب‌نمایی [۶]، مطالعات محیطی [۷] و مطالعات کیهانشناسی [۸] مورد استفاده قرار گیرند.



با توجه به ویژگی‌های این آشکارسازها، در این مقاله تلاش شده است تا علاوه بر شبیه‌سازی پاسخ این آشکارسازها نمونه‌ی اولیه‌ای از این آشکارسازها ساخته شده و پاسخ آن با پاسخ‌های شبیه‌سازی مقایسه شوند.

۲- زمینه نظری

از نظر ترمودینامیکی، برای تشکیل حباب در یک مایع باید انرژی صرف شود. حداقل انرژی لازم برای تشکیل یک حباب در یک محیط با تنش سطحی $\gamma(T)$ در دمای T بصورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$W = \frac{16\pi \gamma(T)^3}{3 (\Delta P)^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱) $\Delta P = P_v - P_0$ است، که P_v فشار بخار مایع مورد نظر و P_0 فشار اعمال شده بر سطح مایع است. در یک آشکارساز حبابی انرژی لازم برای تشکیل حباب به طور غیر مستقیم توسط نوترون تامین می‌شود. بدین صورت که در اثر برهمکنش کشسان نوترون و هسته‌های مایع فوق گرم این هسته‌ها پس زده می‌شوند. اگر هسته با عدد اتمی A تحت زاویه θ نسبت به جهت نوترون فرودی پراکنده شود، انرژی آن بر حسب انرژی نوترون (E_n) برابر خواهد بود با [۱]:

$$E_A = \frac{4AE_n}{(A+1)^2} \cos \theta \quad (2)$$

اگر فرض شود که هسته پراکنده شده در محیط مسافت L را بپیماید، انرژی داده شده به محیط توسط هسته مذکور بصورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$E_D = L \left(\frac{dE}{dx} \right) \quad (3)$$

فرآیندهای ترمودینامیکی حین انتقال انرژی به مایع سبب می‌شود از انرژی داده شده به محیط تنها کسر کوچکی (۲٪ تا ۶٪) سبب تشکیل حباب شود [۹]. این کسر کوچک بازدهی ترمودینامیکی نامیده و با η_T نمایش داده می‌شود، بنابراین شرط تشکیل حباب را می‌توان بصورت زیر نوشت [۱].

$$\eta_T E_D > W \quad (4)$$

۳- شبیه‌سازی پاسخ آشکارساز حبابی

پاسخ یک آشکارساز قطره فوق گرم در دمای T و برای نوترون‌هایی با انرژی E_n بصورت زیر نوشته می‌شود [۱]:

$$R(E_n, T) = \phi(E_n) V \sum_{i=1}^n N_i \sum_{j=1}^m \sigma_{ij} F_{ij}(E_n, T) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $\phi(E_n)$ ، N_i ، V ، σ_{ij} و $F_{ij}(E_n, T)$ به ترتیب شار نوترون فرودی، حجم مایع فوق گرم، چگالی عددی هسته‌ی i ام در مایع فوق گرم، سطح مقطع هسته‌ی i ام برای واکنش خاص j ام و احتمال تشکیل حباب می‌باشد.



مهمترین بخش در محاسبه پاسخ آشکارساز حبابی تعیین احتمال تشکیل حباب برای ذرات باردار تولید شده در برهمکنش‌های نوترون با مایع فوق گرم است. برای واکنش‌های (n, p) و (n, α) با توجه به تک انرژی بودن ذرات باردار تولید شده، احتمال تشکیل حباب در هر دما صفر یا یک است. اما در مورد واکنش‌های کشسان با توجه به اینکه با بینایی از ذرات باردار (هسته‌های پس پراکنده شده) سروکار داریم احتمال تشکیل حباب بین صفر و یک متغیر است. به منظور تعیین احتمال تشکیل حباب برای هر نوع از هسته‌های پراکنده شده در برهمکنش کشسان ابتدا به روش ذکر شده در مرجع [۱۰] بیناب هسته‌های پراکنده شده محاسبه می‌شود. با تعیین بیناب، در هر انرژی توان توقف هسته مورد نظر مشخص می‌شود، بنابراین برای هر انرژی از هسته‌ی پراکنده شده می‌توان انرژی داده شده به محیط و در نهایت شرط تشکیل حباب را به کمک رابطه (۴) بررسی کرد. به این ترتیب تعداد هسته‌های پراکنده شده‌ای که منجر به تشکیل حباب می‌شوند تعیین می‌شود. نسبت تعداد این هسته‌ها به کل تعداد هسته‌های پراکنده شده احتمال تشکیل حباب برای یک هسته‌ی خاص می‌باشد.

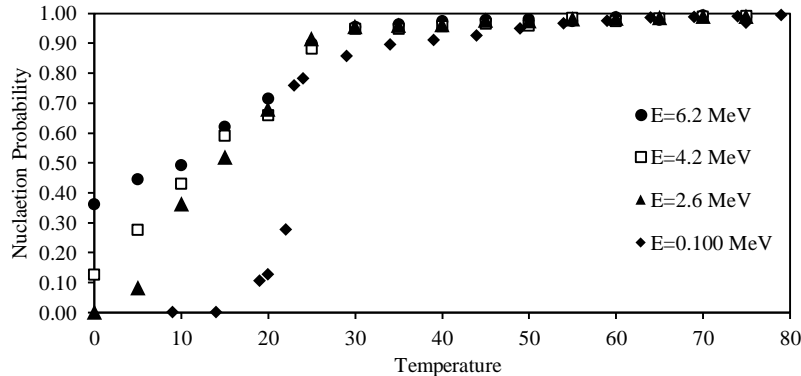
۴- مواد و روش‌ها

به منظور ساخت آشکارساز ابتدا چگالش مایع فوق گرم با استفاده از حمام اتانول یخ خشک صورت می‌گیرد. سپس مایع فوق گرم بصورت قطرات ریز در سراسر محیط پراکنده می‌شوند و در نهایت به منظور معلق سازی قطرات فوق گرم در محیط میزبان از تکنیک پلیمریزاسیون درجا (in situ polymerization) استفاده شده است. همچنین می‌توان از محلول اشباع نمک‌های سنگین برای تنظیم چگالی محیط میزبان و مایع فوق گرم استفاده می‌شود.

به منظور بررسی پاسخ آشکارسازهای حبابی ساخته شده، این آشکارسازها تحت تابش نوترون قرار گرفته‌اند. پرتودهی این آشکارسازها در آزمایشگاه کالیبراسیون سازمان انرژی اتمی بوسیله چشمه ^{252}Cf کوری صورت گرفته است.

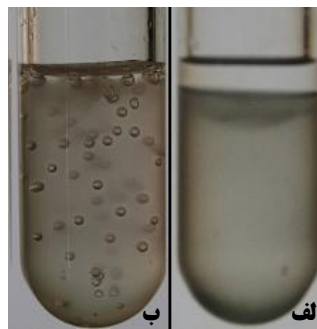
۵- نتایج

با توجه به ترکیب شیمیایی مایع فوق گرم مورد استفاده (CCl_2F_2) ، در اثر برهمکنش کشسان نوترون، هسته‌های کربن، کلر و فلوئور پراکنده می‌شوند. احتمال تشکیل حباب برای هسته‌های کربن‌های پراکنده شده در اثر برهمکنش کشسان با نوترون محاسبه و در شکل ۱ رسم شده است. رفتار کلی احتمال تشکیل حباب برای سایر هسته‌ها نیز به همین صورت است به گونه‌ای که با افزایش دما مقدار احتمال افزایش یافته و به ۱ نزدیک می‌شود. همچنین انرژی نوترون فرودی نیز در احتمال تشکیل حباب اثر گذار خواهد بود، به گونه‌ای که با افزایش انرژی نوترون این احتمال در دماهای پائین افزایش می‌یابد.



شکل ۱- تغییرات احتمال تشکیل حباب مطالعه شده در مایع فریون-۱۲ برای هسته‌ی کربن پراکنده شده بر حسب دما در انرژی‌های مختلف.

در شکل ۲ نمونه‌ای از آشکار ساز ساخته شده نمایش داده شده است. حجم کلی آشکار ساز حبابی نشان داده شده در شکل ۲ در حدود ۲ میلی لیتر است. حجم مایع حساس این آشکار ساز ۵۰ میکرو لیتر است. به عبارت دیگر می توان گفت حجم حساس این آشکار ساز در حدود ۲/۵٪ حجم کل آشکار ساز است. آشکار ساز نشان داده شده در شکل ۲- الف، آشکار ساز حبابی قبل از پرتو دهی را نشان می دهد. همانگونه که در شکل نیز نشان داده شده است، قبل از پرتو دهی هیچگونه حبابی در آشکار ساز مشاهده نمی شود، اما پس از پرتو دهی در اثر برهمکنش نوترون با هسته‌های مایع فوق گرم، حباب‌هایی درون آشکار ساز تشکیل شده است. (شکل ۲- ب).



شکل ۲- اثر پرتو دهی بر آشکار ساز حبابی با محیط میزبان از جنس پلی اکریلامید و مایع فوق گرم فریون -۱۲. الف: آشکار ساز حبابی قبل از پرتو دهی. ب: آشکار ساز حبابی پرتو دهی شده بوسیله چشمه Am-Be. دز دریافتی این آشکار ساز ۲۰۰ میکروسورت است.

تعداد حباب‌های تشکیل شده در یک آشکار ساز حبابی در شرایط ترمودینامیکی ثابت متناسب با دز دریافتی نمونه است. در شکل ۳ تغییرات تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکار ساز ساخته شده با تغییرات میزان دز دریافتی مشاهده می شود.



شکل ۴- تغییرات تعداد حباب‌های تشکیل شده با تغییرات دز دریافتی از چشمه Am-Be الف: دز دریافتی ۵۰ میکروسیورت. ب: دز دریافتی ۲۰۰ میکروسیورت.

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش میزان دز دریافتی، تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکار ساز افزایش می‌یابد. تعداد حباب‌های تشکیل شده برای دزهای جذبی مختلف چشمه در میدان Am-Be در جدول ۱ نشان داده شده است. پرتودهی آشکارسازها همانگونه که در جدول ۱ نشان داده شده است تا دز ۲۰۰ میکروسیورت انجام شده است و تا این دز رفتاری خطی از آشکارسازهای حبابی مشاهده شده است.

جدول ۱- مقایسه میان نتایج تجربی و محاسباتی پاسخ آشکار سازهای حبابی ساخته شده بر حسب میزان دز نوترون دریافتی از چشمه Am-Be.

دز دریافتی (μSv)	پاسخ تجربی	پاسخ محاسباتی
۱۰۰	۳۲	۲۹
۱۵۰	۴۴	۴۳
۲۰۰	۶۲	۵۷

۶- بحث و نتیجه‌گیری

آشکارسازهای حبابی به عنوان ابزاری مفید در آشکارسازی نوترون امروزه بصورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است با تغییر شرایط ترمودینامیکی (دما) احتمال تشکیل حباب و در نهایت پاسخ این آشکارسازها تغییر می‌کند، به گونه‌ای که برای هر انرژی نوترون دمای آستانه آشکارسازی متغیر است. این ویژگی امکان بیناب نمائی با استفاده از آشکارسازهای حبابی را فراهم می‌سازد.

آشکارسازهای حبابی بصورت کلی دارای ابعاد کوچک هستند. پرتودهی این آشکارسازها با نوترون سبب تشکیل حباب در این آشکارسازهای می‌شود. این حباب‌ها همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده با چشم



غیر مسلح نیز قابل مشاهده و شمارش هستند. قابلیت قرائت آسان و مستقیم این آشکارسازها مزیت مهم آشکارسازهای حبابی است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش میزان دز دریافتی تعداد حباب‌های تشکیل شده در آشکار ساز نیز افزایش می‌یابد. طبق اطلاعات جدول ۱، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تعداد حباب‌های تشکیل شده بر حسب میزان دز دریافتی یک رفتار خطی دارد.

۷- سپاسگزاری

صمیمانه از زحمات آقای مهندس ابراهیم عطائی که در این کار با ما همکاری نمودند، سپاسگزاری می‌نمائیم.

۸- مراجع

- 1- Apfel. R. E, the Superheated Drop Detector, Nucl. Instr.and Meth.A, 162, 603-608 (1979).
- 2- Glacer. D. A, Some Effects of Ionizing Radiation on the Formation of Bubbles in Liquids, Phys. Rev. 87,665(1952).
- 3- Ing. H, Brinboim. H. C, A Bubble-Damage Detector for Neutrons, Nuclear Track and Radiation Measurements, 8, 285-9 (1984).
- 4- Roy. S.C, Superheated Liquid and its Place in Radiation Physics, Radiation Physics and Chemistry, 61, 271-281(2001).
- 5- Apfel. R. E, Roy. S. C, Investigations on the Applicability of Superheated Drop Detector in Neutron Dosimetry, Nucl. Instr.and Meth.A, 219, 582-587(1984).
- 6- Bonin. H. W, et al, Fast Neutron Dosimetry and Spectroscopy using Bubble Detectors, Radiation Protection Dosimetry, 46, 265-271, (1993).
- 7- Wang. C.K, et al, Use of Superheated Liquid Dispersion Technique for Measuring Alpha-Emitting Actinides in Environmental Samples, Nucl. Instr.and Meth.A, 10, 524-527 (1994).
- 8- Azuelos. G, et al, Direct Dark Matter Search using Large-Mass Superheated Droplet Detectors in the Picasso Experiment, Radiation Protection Dosimetry, 120, 495-498 (2006).
- 9- Apfel. R. E, et al, Superheated Drop Nucleation for Neutron Detection, Applied Scientific Research, 38, 117-122(1982).
- ۱۰- رئیس‌علی، غلامرضا و رضائیان، پیمان، محاسبه بیناب هسته‌های پراکنده شده در پراکندگی کشسان نوترون، کنفرانس

فیزیک ایران، یزد، شهریور ۱۳۹۱