تعیین پارامترهای بهینه خورش برای CR-39 به عنوان آشکارساز نوترون

INC29-1304

نورا نصیری مفخم*، مجتبی کاکایی، رضا حاصلی

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵ تهران، ایران

چکیده:

در این تحقیق پارامترهای خورش شیمیایی (زمان خورش، دما، نرمالیته محلول خورش) فیلم CR-39جهت بکارگیری به عنوان آشکارساز نوترون مورد مطالعه قرار گرفت و بهینه‌سازی شد. نمونه فیلم‌های CR-39در یک واکنش‌گر، به مدت زمان‌های مختلف تحت تابش طیف استاندارد و کالیبره نوترون سریع و حرارتی قرار گرفتند. ردپاها ایجاد شده در نمونه های CR-39 پرتودهی شده، پس از خورش شیمیایی در محلول‌های آبی با غلظت‌های مختلف و در بازه های زمانی متفاوت با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۲۰۰ شمارش شدند. پس از حذف ردپاهای کم عمق و متداخل، چگالی ردپاهای حاصل از اندرکنش نوترون‌ها، در شرایط مختلف خورش محاسبه شدند. با مقایسه نتایج بدست آمده از فرایندهای خورش ردپا، پارامترهای خورش شیمیایی برای آشکارسازی نوترون بهینه‌سازی شد. بازدهی آشکارسازی در شرایط بهینه برای فیلم CR-39، ۷۶٪ بدست آمد. نتایج این مطالعه در نیروگاه‌های قدرت و تحقیقاتی، مراکز گداخت، شتابدهنده‌های انرژی بالا و تجهیزات باریکه یونی که در آنها از CR-39 به عنوان دزیمتر نوترون استفاده می‌شود، کاربرد دارد.

کلیدواژه‌ها: پارامترهای خورش شیمیایی، ردپا نوترون، دزیمتری نوترون، بازده آشکارسازی.

تعیین پارامترهای بهینه خورش برای CR-39 به عنوان آشکارساز نوترون

نورا نصیری مفخم*، مجتبی کاکایی، رضا حاصلی

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵ تهران، ایران

Abstract:

The chemical etching parameters (etching time, temperature, normality of etchant) for use of CR-39 as neutron detector have been studied and optimized. The CR-39 films placed in radiator were exposed to standard and calibrated thermal and fast neutron sources for different time intervals. Etched tracks were analyzed and counted at 200X with microscope after etching in different etchant normality and etching time intervals. Neutron interaction track density was calculated after every hour of etching time, which is considered due to removal of shallow tracks and overlapping tracks. Comparing the obtained results, optimizing etching conditions were found for neutron detection purpose. The detection efficiency was obtained 76% for CR-39. The results of this study can be applied for nuclear power plant, fusion facilities, high energy accelerator s and radioactive beam facilities where CR-39 were used as neutron dosimeter.

Keywords: Chemical etching parameters, Neutron track, Neutron dosimeter, detection efficiency.

۱. مقدمه

آشکارسازهای ردپا هسته‌ای حالت جامد[1]، قابلیت بکارگیری در کاربردهای جدیدی در حوزه تحقیقات پرتوی و همچنین دزیمتری در برنامه‌های پایش پرتویی دارند [۱]. ذرات باردار از طریق ایجاد تخریب در ساختار ماده آشکارساز در طول مسیر حرکت‌شان، بر آشکارساز ردپا بجا می‌گذارند. از آنجایی که نواحی تخریب شده بسیار کوچک و پنهان هستند، با میکروسکوپ نوری نیز به وضوح قابل مشاهده نیستند. برای مشاهده و آشکارسازی نواحی تخریب شده توسط پرتوها روش شناخته‌شده خورش شیمیایی به‌کار می‌رود. تجربیات و تحقیقات نشان داده‌است که در شرایط بهینه خورش شیمیایی، اندازه نواحی تخریب شده (ردپاها) تا $10^{-2}-10^{-4}$ cm افزایش می‌یابند [۱].

چند دهه است که آشکارسازهای ردپا هسته ای حالت جامد، در زمینه آشکارسازی نوترون به‌کارگرفته شده‌اند [۱-۵]. این آشکارسازها ویژگی‌های بارز و منحصر بفردی در قیاس با دیگر آشکارسازها دارند که از آن جمله می‌توان به، پایداری ردپاها در طول زمان، عدم حساسیت به پرتوهای گاما، فرابنفش، بتا و پرتو ایکس، قابلیت استفاده طولانی مدت پایش اشاره کرد. در سال‌های گذشته تحقیقات بر روی ویژگی‌های خورش آشکارسازهای پلیمری، اساسا بر روی یو-نهای سنگین و پروتون‌ها بوده است و تحقیقات محدودی در زمینه تاثیر نوترون بر آنها و تعیین مشخصات خورش شده است[۴ و ۵]. از آنجایی‌که نوترون ذره خنثی است، مستقیما در آشکارساز موجب یونیزاسیون نمی‌شود و در نتیجه به-طور مستقیم ردپایی در آشکارساز، به‌جا نمی‌گذارد. با این وجود، اثرات ثانویه نوترون به شکل اتم‌های پس زده حاصل از واکنش نوترون با ماده آشکارساز می‌توانند بر اثر یونیزاسیون، ذرات باردار تولید کنند که موجب ایجاد ردپا می‌شوند. ردپاها باعث شکست زنجیره مولکولی و رادیکال‌های آزاد می‌شوند.

بهینه‌سازی فرآیند آشکاسازی برای اهداف خاص اساسا به استانداردسازی پارامترهای خورش نظیر زمان خورش، دما و نرمالیته محلول خورش برحسب آهنگ اتلاف انرژی پرتوها در ایجاد ردپا بستگی دارد. در این پژوهش عملی، پارامترهای خورش ردپا آشکارساز CR-39 جهت آشکارسازی نوترن مورد آزمون و بررسی قرار گرفت. با تحلیل داده‌های علمی و مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق، پارامتراهای بهینه خورش شیمیایی آشکارساز CR-39 برای بکارگیری در میدان‌های نوترونی تعیین گردید.

در این تحقیق چگالی ردپاها و مشخصات بصری آنها بررسی شد. نتایج این تحقیق می‌تواند در نیروگاه‌های قدرت و تحقیقاتی، مراکز گداخت، شتابدهنده‌های انرژی بالا و تجهیزات باریکه یونی کاربرد داشته باشد که در آنها، آشکارساز CR-39 در برنامه‌های حفاظت پرتوی استفاده شده باشد.

۲. روش کار

در این مقاله، از فیلم‌های CR-39 محصول شرکت TASTRAK پلیمری شفاف و سخت به ضخامت $100-200\ \mu m$ و چگالی حدود $1{,}3\ g/cm^3$ استفاده شد. نمونه آشکارسازهای CR-39 به ابعاد $2{,}5\times2{,}5\times0{,}5\ cm^3$، با لیزر برش داده می‌شوند تا آسیب سطحی، بر روی لبه‌های آشکارساز ایجاد نشود. تمامی نمونه‌های آشکارساز CR-39 در راکتور مینیاتوری MNSR پژوهشکده راکتورها تحت تابش طیف کالیبره نوترون حرارتی به میزان $1\times10^{12}\ n/cm^2.s$ قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در اتاقک کالیبراسیون نظام ایمنی هسته‌ای کشور، تحت تابش نوترون سریع با چشمه استاندارد $Am-Be^{241}$ و در دمای اتاق پرتوگیری شدند. سمت پرتودیده این نمونه‌ها در مرحله قبلی، تحت شار نوترونی $(1{,}943\times10^7\pm0/08)\ n/s$ و آهنگ دز چشمه $976{,}8\ \mu Sv/h$ در فاصله $50\ cm$ پرتودهی شدند. شکل ۱، نمونه آشکارساز آماده شده برای آزمایش‌های تعیین پارامترهای بهینه خورش شیمیایی ردپاهای حاصل از نوترون‌های سریع و حرارتی، در آشکارساز CR-39 را نشان می‌دهد.

---

[1] Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTDs)

Email: nnasiri@aeoi.org.ir

شکل ۱. نمونه آشکارسازهای CR-39 برای انتخاب پارامترهای خورش شیمیایی به منظور آشکارسازی نوترون سریع و حرارتی.

در دنیا برای آشکارسازی ردهای حاصل از اندرکنش نوترون با آشکارسازهای پلیمری، از محلولهای آبی KOH ۶ نرمال و NaOH ۶ و ۷ نرمال در مدت زمانهای ۴، ۶ و ۹ ساعت با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود [۱-۵]. به منظور تعیین پارامترهای مناسب خورش شیمیایی، نمونه‌های پرتودهی شده مطابق با شرایط بالا خورش داده شدند و سپس از نواحی مختلف نمونه‌های خورش داده شده (دور از لبه ها) با میکروسکوپ نوری (بزرگنمایی ۲۰۰) تصویربرداری و شمارش می‌شود.

۳. بررسی نتایج

به منظور تعیین تعداد ردپا، از هر نمونه، ۱۰ عکس گرفته و شمارش شدند. به این ترتیب تعداد ردپاهای نمونه‌ها میانگین تعداد شمارش شده در ۱۰ تصویر است. مشاهده شد که ردپاها پس از دو ساعت خورش شروع به ظهور می-کنند و در زمان ۴ ساعت خورش قابل مشاهده می‌شوند. رشد ردپاها تا زمان ۶ ساعت برای محلول خورش KOH و ۹ ساعت برای محلول خورش NaOH ادامه می‌یابد و از آن پس روند کاهش تعداد مشاهده شد.

با فرض توزیع یکنواخت پرتوگیری نمونه در میدان نوترون و تابش همسانگرد باریکه‌های نوترونی، تعداد ردپاها در سطح مشخصی از نمونه مثلا S شمارش می‌شود. برای کاهش خطای آماری شمارشها در نواحی مختلف نمونه (تصاویر ثبت شده از هر نمونه) انجام می‌شود و میانگین آن، n، در محاسبات به‌کار می‌رود. بازده آشکارساز متناسب با چگالی ردپا و از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۶]:

$$\eta = f\frac{n}{s} \qquad (1)$$

که ضریب f به ویژگی‌های هندسی و فیزیکی چشمه نوترون بستگی دارد. چون شرایط چشمه نوترون سریع و حرارتی در مدت زمان آزمایش‌ها، بدون تغییر بود بنابراین با ثابت بودن سطح مشخص نمونه، بازده آشکارساز مستقیما متناسب با تعداد ردپا میانگین است. نتایج شمارش، تعداد ردپاهای حاصل از پرتودهی در دز دریافتی ۱۰ μSv میدان‌های نوترونی سریع و گرمایی، به منظور انتخاب پارامترهای خورش، به ترتیب در جدول‌های ۱ و۲ آمده است. شکل ۲، تصاویر ردپاهای حاصل از نوترون‌های سریع در شرایط مختلف خورش شیمیایی را که در جدول ۱ آمده است، نشان می‌دهد.

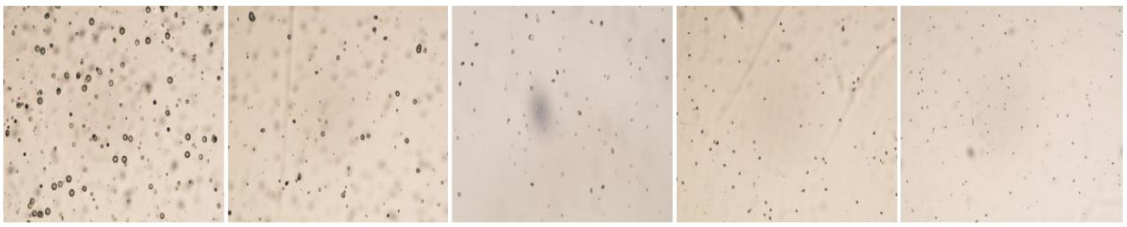
جدول ۱. نتایج شمارش ردپای حاصل از نوترون سریع در آشکارساز CR-39 به روش خورش شیمیایی.

محلول خورش	پارامترهای خورش (زمان، نرمالیته، دما)	تعداد میانگین ردپا
KOH	۷۰ °C ، ۴ hr،۶ N	۱۱۷
KOH	۷۰ °C ، ۶ hr،۶ N	۱۴۶

NaOH	۷۰ °C ، ۶ hr،۶ N	۳۹
NaOH	۷۰ °C ، ۶ hr،۷ N	۱۶۱
NaOH	۷۰ °C ، ۹ hr،۷ N	۲۳۴

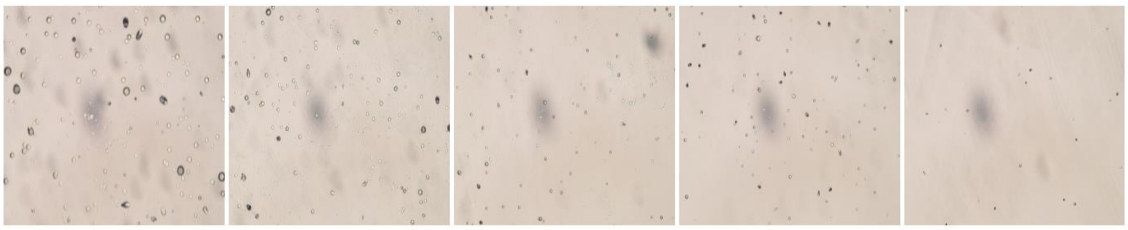
جدول ۲. نتایج شمارش ردپای حاصل از نوترون حرارتی در آشکارساز CR-39 به روش خورش شیمیایی

محلول خورش	پارامترهای خورش (زمان، نرمالیته، دما)	تعداد میانگین ردپا
KOH	۷۰ °C ، ۴ hr،۶ N	۹۴
KOH	۷۰ °C ، ۶ hr،۶ N	۱۲۳
NaOH	۷۰ °C ، ۶ hr،۶ N	۳۶
NaOH	۷۰ °C ، ۶ hr،۷ N	۱۳۳
NaOH	۷۰ °C ، ۹ hr،۷ N	۲۲۱



(الف) (ب) (ج) (د) (ه)

شکل ۲. تصاویر ردپای حاصل از نوترون سریع در فرایند خورش با دمای ۷۰ °C در شرایط (الف) محلول آبی KOH ۶ نرمال به مدت ۴ ساعت. (ب) محلول آبی KOH ۶ نرمال به مدت ۶ ساعت ، (ج) محلول آبی NaOH ۶ نرمال به مدت ۶ ساعت، (د) محلول آبی NaOH ۶ نرمال به مدت ۶ ساعت و (ه) محلول آبی NaOH ۶ نرمال به مدت ۹ ساعت.



(الف) (ب) (ج) (د) (ه)

شکل ۳. تصاویر ردپای حاصل از نوترون حرارتی در فرایند خورش با دمای ۷۰ °C در شرایط (الف) محلول آبی KOH ۶ نرمال به مدت ۴ ساعت. (ب) محلول آبی KOH ۶ نرمال به مدت ۶ ساعت ، (ج) محلول آبی NaOH ۶ نرمال به مدت ۶ ساعت، (د) محلول آبی NaOH ۶ نرمال به مدت ۶ ساعت و (ه) محلول آبی NaOH ۶ نرمال به مدت ۹ ساعت.

از رابطه (۱) به خوبی مشخص است که بازده‌ی آشکارساز، با تعداد ردپاهای شمارش شده، نسبت مستقیم دارد. بنابراین نتایج شرایط خورش و نمونه‌هایی که در آن بیشترین تعداد ردپای مطلوب را به‌دست دهد، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. داده‌های عملی نشان دادند که برای فیلم‌های CR-39 بکاررفته در این تحقیق، تحت شرایط یکسان پرتوگیری در میدان نوترونی، محلول خورش NaOH در مقایسه با محلول خورش KOH تصاویر واضح‌تر، بیشتر و مطلوبی را برای شمارش ردپاها به‌دست می‌دهد و در نتیجه بازدهی بالاتری دارد. بازده آشکارسازی تحت شرایط یکسان، برای

محلول خورش NaOH حدود ۱۵٪ بیشتر است. همچنین با افزایش زمان خورش، بازدهی آشکارسازی به ترتیب برای این دو محلول حدود ۵٪ بیشتر می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

بررسی نتایج عملی نشان می‌دهد که، بازده‌ی آشکارساز در شرایط خورش با محلول NaOH، ۷ نرمال در دمای $70\ ^{\circ}C$ به مدت زمان ۶ و ۹ ساعت، حدود ۷۶٪ است در حالی‌که برای شرایط NaOH، ۶ نرمال و ۶ ساعت، این میزان به حدود ۷۰٪ کاهش می‌یابد بازدهی آشکارسازی برای محلول KOH،۶ نرمال در مدت زمان ۴ و ۶ ساعت، به ترتیب ۵۶٪ و ۶۱٪ به‌دست آمد. از سوی دیگر، وضوح و مشخصات هندسی ردپاها در شرایط خورش با محلول NaOH، ۷ نرمال در دمای $70\ ^{\circ}C$ به مدت زمان ۶ و ۹ ساعت، از کیفیت مطلوب و قابل شمارش برخوردار بود. با توجه به اینکه ۶ ساعت زمان معقولی برای فرایند خورش آشکارساز CR-39 و مراحل تصویربرداری و ذخیره عکس‌ها در یک روز کاری محسوب می‌شود، و همچنین مطلوب بودن آن برای هر دو ردپای حاصل از نوترون سریع و گرمایی، شرایط بهینه خورش آشکارساز CR-39 برای آشکارسازی در میدان نوترون‌های سریع و حرارتی، محلول NaOH، ۷ نرمال در دمای $70\ ^{\circ}C$ به مدت زمان ۶ ساعت، تعیین شد. نتایج حاصله نشان می‌دهند که آشکارساز CR-39، قابلیت به‌کارگیری جهت آشکارسازی و دزیمتری نوترون به ویژه در شتابدهنده‌های انرژی بالا، تجهیزات باریکه یونی، نیروگاه‌های قدرت و نیروگاههای گداخت را در کنار دیگر روش‌های رایج دارد.

۵. مراجع

1. Guo S., Chen L., Durrani S.A., Solid-state nuclear track detectors, Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 1, 308-407, 2020
2. Tsuruta, T., Koguchi, Y., Yasuda, N., Discrimination of heavy ions using copolymers of CR-39 and DAP., Radiat. Meas. **43**, S48-S51, 2008
3. Nikolaev, V.A., Solid State Nuclear Track Detectors in Radiation Research. Publishing House of SPbPU, Saint-Petersburg, 2015
4. Duan, X.J. et al., Calibration of solid state nuclear track detector CR-39 with monoenergetic protons, Acta Phys. Sin. **59**, 221-227, 2010
5. Kanasaki, M., Jinno, S., Sakaki, H., Kondo, K., Oda, K., Yamauchi, T., Fukuda, Y., The precise energy spectra measurement of laser-accelerated MeV/n-class high-Z ions and protons using CR-39 detectors. Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 034013, 2016
6. Fleischer, R.L., Tracks to Innovation, Nuclear Tracks in Science and Technology. Springer, New York, 1998