

روش جدید خورش چندمرحله‌ای کالیبراسیون آشکارساز ردپای هسته‌ای CR-۳۹ برای بیناب‌سنجی ذرات آلفا

فرید بهرامی^{۱*}، فریدون عبدالله میانجی^۲، مهران طاهری^۲ و رضا فقیهی^۱

^۱ دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.

^۲ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

* فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی پرتوپزشکی، کد پستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸

پست الکترونیکی: fbr861@gmail.com

چکیده

در این مقاله، کاربرد آشکارساز غیرفعال ردپای هسته‌ای CR-۳۹ در بیناب‌سنجی ذرات آلفا مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از یک چشمه استاندارد امرسیوم-۲۴۱ به عنوان منبع پرتو آلفا و لوله‌های موازی‌ساز برنجی با ارتفاع‌های مختلف، برای تعیین انرژی ذرات آلفا استفاده شد. آشکارسازها با ذرات آلفا در محدوده انرژی $MeV \ 4/8 - 8$ تابش داده شده و خورش آن‌ها با محلول هیدروکسید سدیم در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و بر پایه روش خورش چندمرحله‌ای با بازه‌های زمانی ۱/۵ ساعتی انجام شد. نتایج تجربی حاصل نشان داد که با افزایش زمان خورش، بیشینه قطر ردپای ظاهر شده بر روی آشکارسازها در انرژی‌های بالاتر ذرات آلفا رخ می‌دهد. با توجه به بروز همپوشی (یک به یک نبودن) در منحنی «انرژی آلفا - قطر ردپا» در زمان‌های خورش ناکافی، با انجام آزمایش‌های لازم کمینه زمان خورش لازم برای بیناب‌سنجی مؤثر در محدوده انرژی آلفای $MeV \ 4/8 - 0/8$ تعیین گردید. نشان داده شد که با افزایش زمان خورش تا ۱۰/۵ ساعت می‌توان بر مشکل همپوشی در بازه انرژی مورد نظر غلبه کرده و نموداری کاربردی برای بیناب‌سنجی ذرات آلفا در یک میدان ناشناخته تهیه کرد. همچنین راندمان ثبت این آشکارساز برای ذرات آلفا در بازه انرژی‌های مورد بررسی نزدیک به ۱۰۰٪ به دست آمد.

کلید واژگان: دزسنجی ردپا، قطر ردپا، محلول خورش، بیناب‌سنجی آلفا.

۱. مقدمه

دزسنجی ردپا^۱ یکی از روش‌های غیرفعال مفید و ارزان نسبت به آشکارسازهای فعال جهت اهداف متفاوت آشکارسازی می‌باشد. روش اندازه‌گیری ذرات باردار سنگین و پاره‌های شکافت با مشاهده ردپای آن‌ها در برخی مواد آلی و غیرآلی، سال‌هاست که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. آشکارسازهای ردپای

هسته‌ای حالت جامد^۲ (SSNTDs) را یانگ در سال ۱۹۵۸ معرفی کرد [۱]. عملکرد آشکارسازهای ردپای هسته‌ای حالت جامد بر این اساس است که وقتی یک ذره باردار سنگین از ماده عبور می‌کند، یون‌سازی گسترده در ماده انجام می‌دهد. یون‌سازی ابتدایی منجر به یک سری فرایندهای شیمیایی جدید شده که سبب تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود. در طول مسیر ذره آلفا،

1. Track dosimetry

2. Solid state nuclear track detector

رادیکال‌های آزاد شیمیایی ایجاد می‌شود که به آن‌ها ردپای نهان^۱ گفته می‌شود. اگر ماده دارای ردپاهای نهان، در معرض یک محلول مهاجم از نظر شیمیایی قرار بگیرد، واکنش‌های شیمیایی در امتداد ردپاهای نهان بیشتر خواهد بود. معمولاً از محلول‌های آبی NaOH و KOH به این منظور استفاده می‌شود. محلول خورش شیمیایی در آن نواحی، از آشکارساز که ردپا ایجاد شده، خوردگی بیشتری ایجاد می‌کند تا سایر نواحی که ردپا ایجاد نشده است. با این روش، یک ردپا از ذره شکل گرفته که زیر میکروسکوپ نوری قابل مشاهده خواهد بود. در واقع در این نوع آشکارسازها قطر ردپا^۲ به‌عنوان معیاری از انرژی ذرات باردار سنگین است. یکی از رایج‌ترین آشکارسازهای ردپای هسته‌ای مورد استفاده CR-۳۹ است که کارترایت و همکاران، آن را برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ معرفی کردند [۲]. این آشکارساز علاوه بر حساسیت به ذرات آلفا و نوترون سریع، به دلیل آستانه^۳ ثبت بسیار پایینی که دارد، به پروتون‌ها نیز پاسخ می‌دهد [۳]. این آشکارساز خصوصیتی از قبیل همگنی و همسانی بالا، شفافیت نوری و یکنواختی بالا دارد، ولی نسبتاً گران و کمیاب بوده و درعین حال شکننده نیز می‌باشند. برای آشکارساز پرتودهی شده^۴ CR-۳۹ عمدتاً از روش خورش شیمیایی استفاده می‌شود که در این روش از یک محلول خورنده مانند سود یا پتاس استفاده می‌شود که به نواحی دارای ردپا حمله کرده و بر اثر واکنش، باعث بزرگ‌تر شدن ردپاها می‌شود. دمایی که طی آن نمونه‌ها در حال خورش هستند، دمای خورش^۳ نامیده می‌شود. دما و زمان خورش از جمله پارامترهای بسیار مهم در خورش شیمیایی هستند. با توجه به خصوصیات ذکر شده و حساسیت این آشکارسازها به ذرات آلفا، می‌توان از آن‌ها در اهدافی که آشکارسازی و دزسنجی آلفا مد نظر باشد، مانند دزسنجی رادن، بیناب‌سنجی^۴ آلفا و... بهره جست

1. Latent track
2. Track diameter
3. Etching temperature
4. Spectroscopy

[۶۴]. در گزارش‌های انتشاریافته در زمینه بیناب‌سنجی آلفا با آشکارساز CR-۳۹ نمودار کالیبراسیونی که بتوان انرژی ذرات آلفا را با دقت $0.1-0.2\text{MeV}$ و با استفاده از دمای خورش ۸۵ درجه سانتی‌گراد تفکیک کرد، وجود ندارد [۷-۹]. در این پژوهش، نمونه‌ها پس از پرتودهی با ذرات آلفای چشمه^۵ امرسیوم-۲۴۱ در محلول هیدروکسید سدیم خورش شده و پس از شست‌وشو برای ارزیابی قطر ردپا زیر میکروسکوپ نوری قرار گرفتند. در نهایت با افزایش دمای محلول خورش هیدروکسید سدیم به ۸۵ درجه سانتی‌گراد و انجام آزمایش‌های لازم با خورش چندمرحله‌ای، روشی مؤثر با دقت قابل قبول برای بیناب‌سنجی آلفا ارائه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

آشکارساز CR-۳۹ به‌کاررفته دارای ضخامت $750\ \mu\text{m}$ و محصول شرکت Tastrack است. برای اینکه تابش یکنواختی به سطح آشکارساز برسد، قطعات کوچک آن به ابعاد $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ مورد استفاده قرار گرفت. برای پرتودهی فیلم‌ها با ذرات آلفا از چشمه^۵ امرسیوم-۲۴۱ استاندارد با انرژی آلفای $5.48\ \text{MeV}$ استفاده شد. انرژی ذرات آلفای برخوردکننده با سطح آشکارساز، با زیاد کردن فاصله^۶ آشکارساز با منبع تولید آلفا، در هوا با فشار 760 میلی‌متر جیوه کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر، هر فاصله بین چشمه تا آشکارساز معادل با بیناب‌سنجی خاصی از انرژی ذرات آلفاست. برای این منظور، موازی‌سازهای برنجی با چندین ارتفاع به‌کار گرفته شد. برای پرتودهی در هر انرژی (انرژی به فاصله^۶ چشمه تا آشکارساز وابسته است) تعداد سه قطعه فیلم مورد استفاده قرار گرفت. با تغییر و انتخاب زمان پرتودهی مناسب، تعداد ذرات آلفای برخورد کرده با سطح آشکارسازها در همه^۷ انرژی‌ها ($0.8, 0.96, 1.0, 2.0, 2.8, 3.5, 4.0$ و 4.8 مگاالکترون ولت) به‌طور یکسان تنظیم شد. (هرچه فاصله^۶ آشکارساز با چشمه بیشتر می‌شود، زمان پرتودهی برای یک شار مشخص افزایش

۱/۵ ساعت، به‌منظور بررسی مشخصات ردپاهای شکل‌گرفته از محلول بیرون آورده شده و با آب شست‌وشو داده شدند تا محلول خورش از سطح آن‌ها زدوده شود. پس از آنکه نمونه‌ها خشک شدند، با استفاده از میکروسکوپ نوری، قطر ردپاهای ایجادشده اندازه‌گیری شد. قطر ۱۰ ردپا در ۱۰ ناحیه مختلف در سه نمونه فیلم مورد ارزیابی قرار گرفت و میانگین آن‌ها محاسبه شد. پس از ارزیابی قطر ردپا، فیلم‌ها دوباره به‌مدت ۱/۵ ساعت در محلول خورش قرار داده شد و مراحل خشک کردن و اندازه‌گیری قطر ردپا دوباره تکرار شد. این عمل سه بار تکرار شده و پس از آن، محلول خورش جدید مورد استفاده قرار گرفت، زیرا قدرت خورش محلول به تدریج کاهش می‌یابد. این عمل به‌منظور تهیه نمودار کالیبراسیون مناسب (بدون مشکل همپوشی انرژی) و در ۸ مرحله ۱/۵ ساعتی انجام شد.

۳. نتایج و بحث

طبق گزارش سهرابی [۱۰] با توجه به تعداد ذرات آلفای برخورداری در یک زمان خاص به سطح آشکارساز نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که راندمان آشکارساز CR-39 برای ذرات آلفا تقریباً ۱۰۰٪ است. این نکته با شمارش تعداد ردپاهای آلفا در منطقه $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ زیر میکروسکوپ نوری و اعمال ضریب تبدیل برای مساحت $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ آشکارساز و در نهایت، مقایسه تعداد کل ردپاهای به‌دست‌آمده با تعداد ذرات برخوردارده آلفا با سطح آشکارساز محاسبه شد. نتایج حاصل از ارزیابی قطر ردپا در بازه ۱/۵ ساعتی برای محلول خورش $6/25\text{ N NaOH}$ در دمای خورش ۸۵ درجه سانتی‌گراد در شکل (۱) قسمت الف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی ذرات آلفا و زمان خورش تا ۴/۵ ساعت، قطر ردپای ذرات آلفا تا انرژی $2/8\text{ MeV}$ افزایش یافته و در این انرژی، به بیشینه مقدار خود رسیده و پس از آن، به کندی کاهش می‌یابد. ذرات باردار با انرژی‌های بیشتر، تخریب خود را در لایه‌های عمقی‌تر ایجاد می‌کنند و تا زمانی که

می‌یابد. فاصله و زمان لازم برای پرتودهی را سهرابی گزارش کرده است [۱۰ و ۱۱]. بر پایه محاسبات موجود و با قرار دادن چشمه در زیر و آشکارساز در بالای موازی‌سازهای با ارتفاع‌های مختلف، نمونه‌ها در بازه انرژی $0/8-4/8\text{ MeV}$ پرتودهی شدند.

۱.۲. تهیه محلول خورش

در این آزمایش، از محلول شیمیایی NaOH با نرمالیت $6/25\text{ N}$ برای خورش نمونه‌های پرتودهی‌شده استفاده شد. برای تهیه محلول با نرمالیت مورد نظر، ابتدا 25 gr سود یا قرص Na وزن و درون بالون 100 CC به تدریج روی آن آب مقطر اضافه شد تا به حجم 100 CC برسد. از آنجایی که واکنش سود با آب واکنش گرمازا است، هر بار پس از افزودن اندکی آب مقطر آن را تکان داده و پس از گرم شدن آن را در ظرف آب معمولی قرار داده تا دمای آن کاهش یابد. سپس دوباره آب مقطر اضافه تا محلول به حجم مورد نظر برسد. باید توجه داشت که افزایش دما اندکی حجم محلول را کاهش می‌دهد. محلول تهیه‌شده در کوره‌ای که به دمای 85 درجه سانتی‌گراد رسیده است، قرار گرفت. تقریباً یک ساعت طول می‌کشد تا دمای محلول به 85 درجه سانتی‌گراد (دمای خورش) برسد. دمای محلول با استفاده از دماسنج کنترل شد.

۲.۲. خورش نمونه‌ها و ارزیابی قطر ردپا

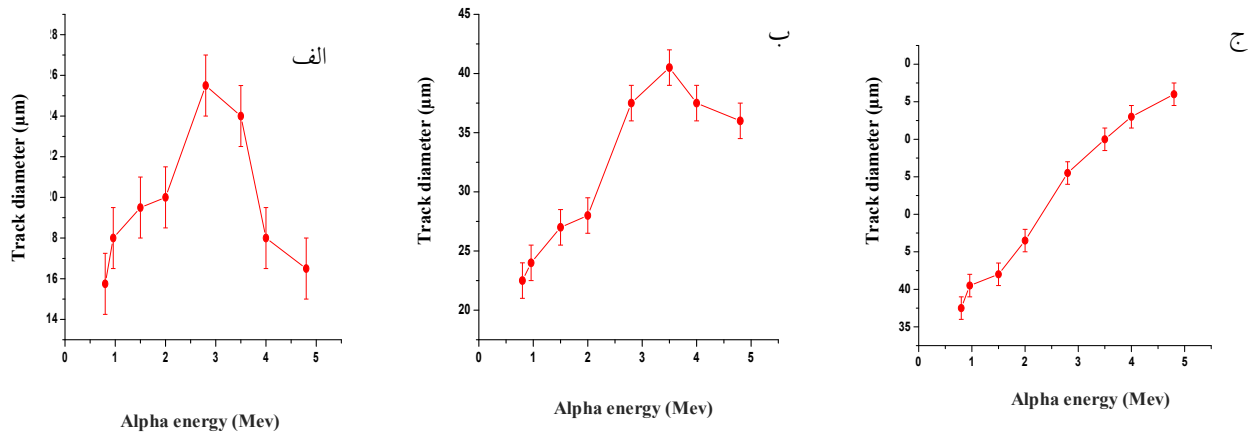
با مته در قسمت خیلی کوچکی از گوشه نمونه‌ها سوراخی ایجاد شده و سیم‌هایی به آن‌ها متصل گردید. پس از اینکه از دمای مطلوب محلول با استفاده از دماسنج اطمینان حاصل شد، با استفاده از این سیم‌ها نمونه‌ها در درون بشری که نیم ساعت در درون کوره قرار داده شده بود تا دمای آن به دمای محلول برسد (برای پیشگیری از خطای ناشی از افت دمای محلول) آویزان شده و محلول در بشر ریخته شد. هنگام ریختن محلول در بشر باید دقت کرد که هر دو طرف نمونه‌ها در محلول غوطه‌ور باشند، زیرا اگر محلول به سطح فیلم نرسد، سطح فیلم خورده نخواهد شد و سبب خطا در نتایج نهایی آزمایش خواهد شد. نمونه‌ها پس از هر

صورت داد. برای مثال، درحالی که نمی‌توان انرژی ذرات آلفا را در زمان خورش ۴/۵ ساعت جداسازی کرد، در زمان‌های خورش ۱۰/۵ یا ۱۲ ساعت، می‌توان اختلافاً انرژی‌های چنددهم مگاالکترون ولت را به‌خوبی جداسازی نمود. تصاویر گرفته‌شده از دو انرژی متفاوت ذره آلفا در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که برای ذره آلفا با انرژی $2/8 \text{ MeV}$ هاله‌ای پررنگ‌تر از هاله مربوط به انرژی 1 MeV دور دایره مرتبط با ردپا را احاطه کرده است و اندازه‌گیری قطر ردپای بزرگ‌تر، آن را تأیید می‌کند. البته این مورد زیر میکروسکوپ نوری بهتر قابل مشاهده است.

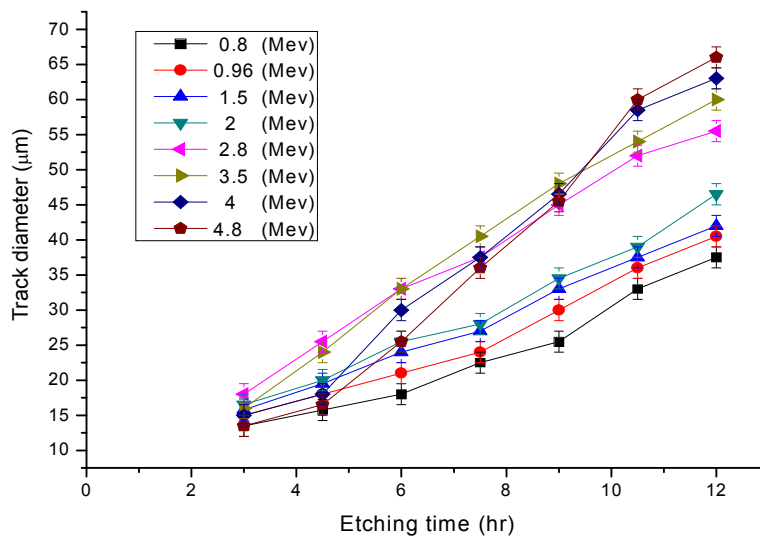
۴. نتیجه‌گیری

نمونه‌های پرتوده‌ی شده با ذرات آلفا در بازه انرژی $4/8 \text{ MeV}$ - $0/8$ توسط چشمه آمرسیوم-۲۴۱ استاندارد، در فرایندی چندمرحله‌ای با بازه‌های زمانی ۱/۵ ساعته تا زمان کل ۱۲ ساعت خورش شدند و نتایج حاصل نشان داد که در زمان‌های خورش کمتر از ۱۰/۵ ساعت، به‌دلیل بروز همپوشی قابلیت جداسازی انرژی برای ذره آلفا وجود ندارد. با روش چندمرحله‌ای پیشنهادی، کمینه زمان خورش ۱۰/۵ ساعت و زمان بهینه ۱۲ ساعت برای کالیبراسیون آشکارساز CR-۳۹ به‌دست آمد و نشان داده شد که بیناب‌سنجی آلفا با دقت $0/1-0/2 \text{ MeV}$ با شرایط خورش پیشنهادی دست‌یافتنی است. کنترل شرایط خورش و تعویض به‌هنگام محلول خورش به‌ویژه با توجه به چندمرحله‌ای بودن فرایند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

انرژی خود را از دست بدهند، به تخریب ادامه داده و در عمقی خاص، بیشترین انتقال انرژی خطی را خواهند داشت. به‌دلیل اینکه در انرژی‌های بالاتر، یونسازی بیشتری رخ داده، اگر به محلول خورش مدت زمان کافی داده شود تا به عمق بیشتر برسد، قطر ردپای بزرگ‌تری در این انرژی‌ها مشاهده خواهد شد. در واقع یعنی با افزایش زمان خورش، قله بزرگ‌ترین قطر ردپا (که مرتبط با قله براگ برای ذرات باردار است) به‌سمت انرژی‌های بیشتر منتقل می‌شود [۱۲]. چنان‌که در شکل (۱) مشاهده می‌شود که در زمان ۴/۵ ساعت، بیشترین قطر ردپا (۲۶ میکرومتر) مرتبط با ذره آلفا با انرژی $2/8 \text{ MeV}$ می‌باشد، ولی با افزایش زمان خورش (به‌دلیل رسیدن کافی محلول خورش به لایه‌های عمقی‌تر) تا زمان ۷/۵ ساعت ماکزیمم قطر ردپا (۴۰ میکرومتر) مرتبط با ذره آلفا $3/5 \text{ MeV}$ است. همان‌طور که در شکل (۱) قسمت‌های الف و ب مشاهده می‌شود، این نمودارها دارای همپوشی (یک به یک نبودن) هستند؛ یعنی اگر نمونه در میدان ناشناس قرار گیرد، از این نمودار نمی‌توان به‌عنوان نمودار کالیبراسیون استفاده کرد، زیرا مشخص نیست این قطر ردپا متناسب با چه انرژی از ذره آلفا می‌باشد. برای مثال در شکل (۱)، قسمت الف قطر ردپای ۱۶ میکرومتر در عین حال می‌تواند مربوط به سه انرژی ۱/۵، ۲/۸ و ۳/۵ مگاالکترون ولت باشد. برای حل این مشکل، زمان خورش به اندازه کافی تا زمان ۱۲ ساعت در همان دمای خورش ۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و در نهایت، قله به‌سمت انرژی $4/8 \text{ MeV}$ انتقال پیدا کرده و بر این مشکل غلبه شد و قطر ردپای ۶۵ میکرومتر حاصل شد. نتیجه کار در نمودار قسمت ج از شکل (۱) نمایش داده شده که نموداری کاربردی برای بیناب‌سنجی ذره آلفا در میدان ناشناخته است. با انجام فرایند خورش چندمرحله‌ای بر روی آشکارسازهایی که هر یک با یکی از انرژی‌های ذرات آلفا پرتوده‌ی شده بودند، نمودار شکل (۲) به‌دست آمد. همان‌گونه که دیده می‌شود، با استفاده از نمودار شکل (۲) می‌توان تفکیک قابل‌قبولی بین انرژی‌های مختلف در زمان‌های خورش متفاوت

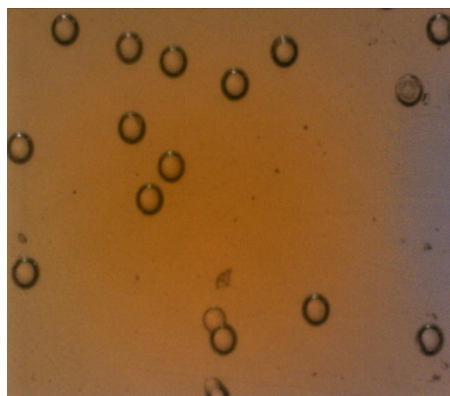


شکل ۱: جابجایی بیشینه قطر ردپا به سمت انرژی‌های بیشتر با افزایش زمان خورش: الف. زمان خورش ۴/۵ ساعت؛ ب. زمان خورش ۷/۵ ساعت؛ ج. زمان خورش ۱۲ ساعت

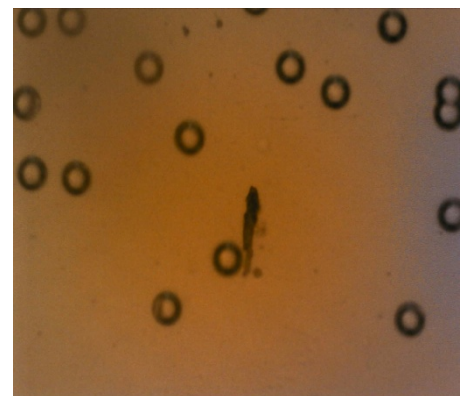


شکل ۲: پاسخ آشکارساز CR-۳۹ به آلفا در زمان‌های خورش مختلف در انرژی‌های مختلف در محلول خورش هیدروکسید سدیم N ۶/۲۵ در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد

A



B



شکل ۳: (A) تصویر مربوط به آلفای ۱ MeV خورش شده در محلول هیدروکسید سدیم به مدت ۴/۵ ساعت و (B) تصویر مربوط به آلفای ۱ MeV خورش شده در محلول هیدروکسید سدیم به مدت ۴/۵ ساعت

سیاسگزاری

به دلیل همکاری صمیمانه در انجام آزمایش‌ها، کمال
سیاسگزاری را دارند.

نویسندگان مقاله از سرکار خانم دکتر سمانه برادران، آقای
مجید صادقخانی، مهندس سهیل نوروززاده و مهندس هرمزی،

۵. مراجع

- [1] D. A. Young. Etching of radiation damage in lithium fluoride. *Nature*. 182 (1958) 375.
- [2] B.G. Cartwright, and E.K. Shirk. A nuclear track-recording polymer of unique sensitivity and resolution. *Nucl. Instrum. and Methods in physics research*. 153 (1978) 457-460.
- [3] A. Majeed, F. Humayon, S. M. Ahmad, S. A. Durrani. A simple technique to discriminate various charged particles using SSNTDs. *Nucl. Track and radiat. Meas.* 22 (1993) 679-682.
- [4] D. Nikezic, k. N. Yu. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Materials Science and Engineering*. 46 (2004) 51-123.
- [5] D. A. Young. On the mechanism of the formation of latent tracks in dielectric solids. *Radiat. Meas.* 27 (1997) 575-586.
- [6] A. H. Smail, M. S. Jaafar. Design and construct optimum dosimeter to detect airborne radon and thoron gas. *Nucl. Instrum.* 269 (2011) 437-439.
- [7] A. H. Khayrat, S. A. Durrani. Variation of alpha-particle track diameter in CR-39 as a function of residual energy and etching conditions. *Radiat. Meas.* 30 (1999) 15-18.
- [8] A. Peter, D. L. Henshaw. High resolution alpha particle spectroscopy using CR-39 plastic track detector. *Nucl. Instrum.* 197 (1982) 517-529.
- [9] M. E. Ghazaly. On alpha particle spectroscopy based on over-etched track length in PADC (CR-39 detector). *Radiat. Effects and Defects in Solids*, 167 (2012) 421-427.
- [10] M. Sohrabi, Sh. Mahdi. Background heat treatment studies in LR-115. *Nuclear Tracks and Radiat. Meas.* 12 (1986) 149-152.
- [11] W. Enge. Introduction to plastic nuclear track detectors. *Nuclear Tracks and Radiat. Meas.* 4 (1980) 283-308.
- [12] M. F. Annuziata. *Handbook of radioactivity analysis*, Academic press, (2003).