

تولید رادیویزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ با استفاده از هدف های آبکاری شده با طلای فوق خالص

### INC29-1036

شهزاد فیضی\*، یوسف فضائلی، پرویز اشتری

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۴۹۸-۳۱۴۸۵، تهران - ایران

#### چکیده:

برای تولید زیرکونیوم-۸۹، معمولاً اهداف جامد ایتیریم طبیعی ساخته شده با روش های مختلف، بر روی زیرلایه آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بخش جداسازی و خالص‌سازی موانعی پیش روی این نوع تارگت‌ها قرار دارد. از جمله این موانع ایجاد گارنت ایتیریم آلومینیوم در مرز بین ماده هدف و زیرلایه آلومینیومی است. پژوهش حاضر، یک سیستم هدف جدید برای تولید رادیویزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ با سیکلوترون سیکلون-۳۰ را بررسی می‌کند. تهیه یک ماده هدف اکسید ایتیریم فشرده بسیار خالص و طراحی هدف ساخته شده از مس برای انتقال حرارت بهتر انجام شد. لایه نشانی هدف به روش الکتروشیمیایی با طلا برای جلوگیری از ورود ناخالصی‌های فلزی (مس، روی و سایر عناصر فلزی کمیاب) انجام شد. همچنین مقطع واکنش هسته‌ای برای بهینه سازی تولید با هدف جدید و پارامترهای تابش هدف مورد ارزیابی قرار گرفت. زیرکونیوم-۸۹ تهیه شده به شکل اگزالات زیرکونیوم-۸۹ دارای خلوص رادیونوکلیدی بالاتر از ۹۹/۹٪ و غلظت ناخالصی شیمیایی پایین (کمتر از ۰/۱ ppm برای عناصر مس و روی) بود. بازده تولید رادیویزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ از طریق واکنش هسته‌ای  $Zr^{89}Y(p,n)^{89}$  برابر  $87 \pm 5 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$  اندازه‌گیری شد (زمان بمباران=۳ ساعت، جریان=۲۰-۳۰ میکروآمپر). اکتیویته ویژه اگزالات زیرکونیوم-۸۹ در محدوده  $10^4 \times 2/3 - 10^4 \times 3/4$  مگابکرل بر میلی‌مول اگزالات بود.

**کلیدواژه‌ها:** زیرکونیوم-۸۹، سیکلون-۳۰، سیکلوترون، ساخت هدف.

## Production of the zirconium-89 radioisotope using ultrapure gold-plated targets

Sh. Feizi\*, Y. Fazaeli, P. Ashtari

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI),  
P.O. Box: 31485-498, Tehran, Iran.

#### Abstract:

The present research, explores a new targetry system for production of zirconium-89 radioisotope with Cyclone-30 cyclotron. The preparation of a highly pure compressed yttrium oxide target material and design of a target made by copper for better heat transfer was performed. Electrodeposition of target with gold was done to prevent the entry of metallic impurities (copper, zinc and other trace metal elements). Nuclear reaction cross sections for optimization of production with new target and irradiation parameters of the target were evaluated. The prepared  $^{89}\text{Zr}$  in the form of  $[\text{Zr}^{89}] \text{Zr-oxalate}$  had high radionuclidic purity (>99.9%) and a low chemical impurity concentration (<0.1 ppm for copper and zinc elements). The yield of  $^{89}\text{Zr}$  radioisotope production via the reaction of  $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$  was measured to be  $87 \pm 5 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$  (time of irradiation = 3 h, the current 20-30  $\mu\text{A}$ ).  $[\text{Zr}^{89}] \text{Zr-oxalate}$  specific-activity was in the range  $2.3 \times 10^4 - 3.4 \times 10^4 \text{ Mbq}/\text{mmol}$  of Oxalate).

**Keywords:** Zirconium-89 production, Cyclone-30, Cyclotron, Targetry.

## ۱. مقدمه:

زیرکونیوم ۸۹ با نیمه عمر ۷۸/۴۱ ساعت و ماکزیم انرژی پوزیترون ۸۹۷ کیلو الکترون ولت، یکی از امیدبخش‌ترین رادیونوکلئیدهای فلزی برای ساخت عوامل تصویربرداری توموگرافی گسیل پوزیترون است. این رادیونوکلئید برای استفاده در طراحی ردیاب‌های رادیواکتیو مبتنی بر آنتی بادی مونوکلونال که برای داشتن یک توزیع زیستی بهینه و تجمع موفق در تومور نیازمند به داشتن زمان طولانی گردش در بدن است، مناسب است [۱-۳]. علیرغم نتایج امیدوارکننده استفاده از این رادیونوکلئید در بدن، به دلیل مراحل جداسازی و خالص‌سازی چالش‌برانگیز، هنوز نتوانسته است جایگاه شایسته و بایسته خود را در مصارف تشخیصی بیابد [۴]. برای تولید زیرکونیوم-۸۹، معمولاً اهداف جامد ایتیریم طبیعی ساخته شده با روش‌های مختلف، از جمله کندوپاش ایتیریم، رسوب الکترونی ایتیریم، پودرهای فشرده ایتیریم، تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای و فویل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. اخیراً، روش‌های تولید اتوماتیک کارآمدی برای اگزالات زیرکونیوم-۸۹ با استفاده از سکه‌های نیوبیوم پوشیده شده با ایتیریم-۸۹ و فویل ایتیریم-۸۹ تعبیه شده در بکینگ آلومینیومی گزارش شده‌اند. در هر دو مطالعه، اهداف سکه‌ای توسط گاز هلیوم و آب سرد خنک می‌شدند [۶]. یکی از موانع اصلی این رویکرد یعنی استفاده از نگهدارنده‌های هدف آلومینیومی یا فویل آلومینیومی برای هدف Y تشکیل ناخالصی‌های آلومینیومی است [۷، ۸]. الیسون و همکارانش هم نشان داده بودند که تولید زیرکونیوم-۸۹ با سیکلوترون با انتقال حرارت اهداف ایتیریم در جریان‌های پرتو بالا محدود شده است [۹]. در طی فرآیند بمباران، دمای بالایی به هدف تحمیل می‌شود و گارنت آلومینیوم ایتیریم (YAG,  $Y_3Al_5O_{12}$ ) در مرزهای بین ماده و قالب تشکیل می‌شود [۱۰، ۱۱]. بنابراین، یک روش جوشکاری نقطه‌ای، بر اساس یک فویل ایتیریم، جوش داده شده به یک تکیه‌گاه تانتالیوم با جت خنک شده که با پرتو پروتون  $14 \mu A / 50 MeV$  بمباران شده بود، معرفی شد. اهداف در سمت جلو با گاز هلیوم و در سمت عقب با آب سرد خنک می‌شدند [۶، ۱۲]. این روش‌های ارائه شده گران بوده و استفاده از ماشین‌آلات نیز دشوار بوده است. هدف اصلی این مطالعه برطرف کردن این محدودیت با توسعه روشی جدید برای تولید زیرکونیوم-۸۹ با خلوص رادیونوکلیدی بالا در سیکلوترون سیکلون-۳۰ می‌باشد. این روش شامل تهیه ماده هدف اکسید ایتیریم فشرده با خلوص بالا، طراحی هدف ساخته شده از مس برای انتقال حرارت بهتر، لایه نشانی الکتروشیمیایی هدف با طلا برای جلوگیری از ورود ناخالصی‌ها از لایه مسی زیرین و ارزیابی سطح مقطع واکنش هسته‌ای برای بهینه‌سازی تولید با هدف جدید، تابش هدف و تصفیه رادیوشیمیایی زیرکونیوم-۸۹ از هدف است. تاجایی که دانش ما یاری می‌کند، این روش، یک روش جدید برای تهیه زیرکونیوم-۸۹ با خلوص رادیونوکلیدی بالا از هدف اکسید ایتیریم از طریق واکنش هسته‌ای  $^{89}Y(p,n)^{89}Zr$  است و می‌تواند برای سایر ایزوتوپ‌های مبتنی بر هدف پودری نیز استفاده شود.

## ۲. روش کار:

## ۲.۱. مواد و روش‌ها:

هیدروکسید سدیم، ایتیریم (III) ایزوپروپوکسید، آب دیونیزه و تتراکلرواوریک اسید از شرکت مرک خریداری شد و به همان شکل خریداری شده استفاده شد. رزین هیدروکسامات (رزین ZR) نیز از شرکت تریسکم فرانسه خریداری گردید. آنالیز رادیونوکلیدی با اسپکتروفوتومتر گاما با وضوح بالا (آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا HPGc، مدل GC1020-7500SL) انجام شد. به علاوه، اکتیویته نمونه‌ها نیز با رادیومتر CRC Capintech اندازه‌گیری شد. سطح مقطع با کد TALYS [۱۳] و قدرت توقف پرتابه در نگهدارنده و ماده هدف با کد SRIM-2013 [۱۴] محاسبه شد. آنالیز حرارتی

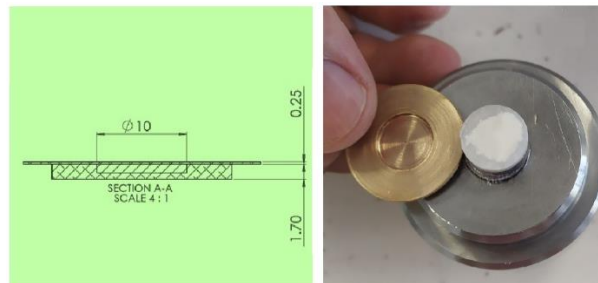
نیز با سرعت گرمایش  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  در هوا با استفاده از Rheometric Scientific STA-1500 انجام شد. الگوی پراش اشعه ایکس با تابش  $\text{K}\alpha$  لامپ مس روی پراش سنج Philips-PW 17C به دست آمد.

## ۲.۲. تهیه و کنترل کیفی ماده هدف ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ):

برای تهیه یک نمونه اکسید ایتیریم خالص، هیدرولیز هیدروترمال ایتیریم (III) تریس (ایزوپروپوکسید) انجام شد. ایتیریم (III) تریس (ایزوپروپوکسید) ۲۰-۳۰٪ در تولوئن (۵ گرم) در یک حمام آب در داخل یک راکتور هیدروترمال فولادی برای اعمال دما و فشار قرار گرفت و راکتور تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۵ درجه سانتیگراد گرم شد. پس از ۲۴ ساعت یک سیستم دو فازی ژل مانند تشکیل شد. برای خروج رطوبت از ژل به مدت یک شب تحت خلا نگهداری شد. سپس ژل خشک شده در خلأ، با روش های TGA/DSC آنالیز حرارتی شد. پس از آن در یک هاون عقیق ساییده و به پودر یکنواختی تبدیل شد. در مرحله بعد، عملیات حرارتی روی پودر حاصل تا دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه انجام شد. در نهایت مشخصه‌یابی محصول با آنالیزهای XRD و SEM انجام شد.

## ۳.۲. بمباران هدف:

پودر اکسید ایتیریم در یک محفظه مسی دیسک مانند با روکش طلا قرار داده شد و با یک جک هیدرولیک فشرده گردید (شکل ۱). قطر دیسک داخلی ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ضخامت هدف، که باید متناسب با انرژی پروتون های فرودی باشد، با استفاده از کد SRIM محاسبه شد. تابش با استفاده از سیکلوترون ۳۰ مگا الکترون ولت (Cyclone-30, IBA, بلژیک) انجام شد. هدف دیسک  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (قطر ۱ سانتی متر، ضخامت ۷۵۴ میکرومتر بر اساس محاسبه با کد SRIM-2013 برای اتلاف انرژی ۱۵ تا ۵ مگا الکترون ولت، حدود ۰/۲۹۶ گرم) برای تولید زیرکونیوم-۸۹ از طریق واکنش هسته ای  $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$  مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. هدف قرصی ایتیریم اکسید و پوشش نگهدارنده مسی لایه نشانی شده با طلا.

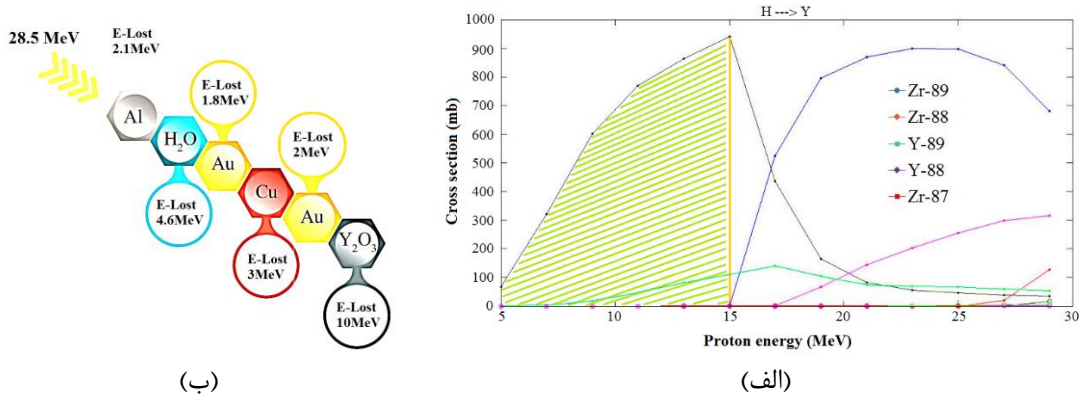
## ۴.۲. جداسازی شیمیایی زیرکونیوم-۸۹:

جداسازی شیمیایی زیرکونیوم-۸۹ از ایتیریم با استفاده از رزین هیدروکسامات تجاری موجود (رزین ZR) طبق پروتکل ارائه شده در دیتاشیت آن با تغییرات جزئی انجام شد [۱۵]. رزین ZR بر اساس گروه عاملی هیدروکسامات کار می کند. با شروع از دیسک بمباران شده، دیسک در ۱۰ میلی لیتر اسید کلریدریک ۲ مولار حل شد و برای اطمینان از اکسیداسیون کامل ۲۵ میکرولیتر آب اکسیژنه ۳۱٪ اضافه شد و با ۴ میلی لیتر آب رقیق شد. یک ستون با ۱۰۰ میلی گرم رزین ZR پر شد. پس از بارگذاری نمونه بر روی رزین، برای خروج ایتیریم چهار بار هربار با ۲/۵ میلی لیتر اسید کلریدریک ۲ مولار شسته شده و سپس چهار بار شستشوی اضافی هربار با ۲/۵ میلی لیتر آب دیونیزه انجام شد. در نهایت، زیرکونیوم-۸۹ با استفاده از اسید اگزالیک ۰/۰۵ مولار (۱/۵ میلی لیتر) شسته شد.

## ۳. بحث و نتایج:

### ۱.۳. محاسبه سطح مقطع ها:

کدهای کامپیوتری TALYS برای محاسبه سطح مقطع و محدوده انرژی ذرات فرودی واکنش هسته ای  $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$  مورد استفاده قرار گرفت تا امکان تولید زیرکونیوم-۸۹ و جلوگیری از تولید ناخالصی‌های ایزوتوپی و رسیدن به بازده تولید مناسب، فراهم شود. با توجه به نتایج محاسباتی نشان داده شده در شکل ۲، حداکثر مقطع در انرژی پروتون ۱۵ مگاالکترون‌ولت، ۹۳۶ mb یافت شد. بنابراین بهترین محدوده انرژی، برای تولید مطلوب، ۵-۱۵ مگاالکترون‌ولت است. بر اساس محاسبات کد SRIM، حداکثر گستره ضخامت، برای توقف پروتون‌های با انرژی ۱۵ MeV (۰ تا ۱۵)، ۱/۷۷ میلی‌متر است. وزن دیسک  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ، با ضخامت فوق، ۰/۴۵۵ گرم است. با توجه به سطح مقطع بسیار کم در ۵ مگاالکترون‌ولت، بهترین محدوده برای تولید، ۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت با ضخامت ۷۵۴ میکرومتر است. وزن دیسک  $\text{Y}_2\text{O}_3$  با این ضخامت ۰/۲۹۶ گرم است. کاهش وزن دیسک  $\text{Y}_2\text{O}_3$  به ما در فرآیند جداسازی شیمیایی هم کمک می‌کند.



شکل ۲. (الف) شرایط تولید رادیوایزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ بر اساس محاسبات کد TALYS برای واکنش هسته ای  $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ . (ب) شمای مسیر پرتو پروتون در طول بمباران بر حسب انرژی (E-Lost؛ انرژی از دست رفته در هر لایه).

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، پروتون با انرژی ۲۸/۵ مگاالکترون‌ولت از خط پرتو خارج می‌شود، ۲/۱ انرژی خود را در اولین لایه آلومینیومی (۰/۵ میلی‌متر پنجره شاتل) از دست می‌دهد و با انرژی ۲۶/۴ MeV وارد آب (۲ میلی‌متر) می‌شود. حدود ۴/۶ MeV از انرژی پرتو در محیط آب، یعنی قبل از ورود پروتون به لایه طلا (۰/۱ میلی‌متر) از دست می‌ورد و با انرژی ۲۱/۸ MeV وارد لایه طلا شده و پس از طی مسیر، ۱/۸ MeV انرژی از دست داده و با انرژی ۲۰ MeV وارد لایه مس (۰/۲ میلی‌متر) می‌شود. حدود ۳ MeV از انرژی پرتو در مس تلف می‌شود. حدود ۲ MeV از انرژی پرتو نیز در لایه دوم طلا (۰/۱ میلی‌متر) اتلاف شده و نهایتاً پرتو با انرژی ۱۵ MeV به  $\text{Y}_2\text{O}_3$  وارد می‌شود.

پیشتر اشاره شده بود که در مطالعات قبلی از نگهدارنده‌های هدف آلومینیومی یا فویل آلومینیومی برای نگه داشتن هدف Y استفاده کرده‌اند. یکی از موانع اصلی این رویکرد، تشکیل ناخالصی‌های آلومینیومی است. در طی فرآیند بمباران، دمای بالایی به هدف تحمیل می‌شود و گارنت آلومینیوم ایتریم (YAG, Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) در مرزهای بین ماده و قالب تشکیل می‌شود. همچنین گزارش‌های دیگری از طراحی انواع دیگری از سیستم‌های هدف برای تولید زیرکونیوم-۸۹ از ایتریم-۸۹ وجود دارد، اما هر کدام نقایصی دارد. به عنوان مثال هدفی شامل لایه نشانی ایتریم بر پوشش مسی که احتمال ورود ناخالصی‌های مس و روی-۶۵ به محصول را در پی دارد. همچنین این تارگت باید در قرص دیگری محاصره شود که این کار باعث عدم سرمایه‌گذاری مناسب قرص اصلی در تماس با آب خنک‌کننده خواهد بود [۱۶]. برای مرتفع شدن این مساله هدف  $\text{Y}_2\text{O}_3$  بر روی یک محفظه مسی با روکش طلا قرار داده شد و در حالی که کاملاً در جریان آب شناور بود، با زاویه ۹۰ درجه نسبت به پرتو فرودی تنظیم شد. در طول بمباران، انتقال حرارت هدف توسط یک سیستم خنک‌کننده آب در دو طرف آن انجام می‌شد. لایه‌های طلا نقش کاهش‌دهنده انرژی و همچنین کاهش ضخامت مس مورد نیاز و افزایش

انتقال حرارت را ایفا می‌کنند. از طرفی احتمال ورود ناخالصی‌ها و واکنش شیمیایی بین مس و ایتیریم را کاهش می‌دهند [۱۷].

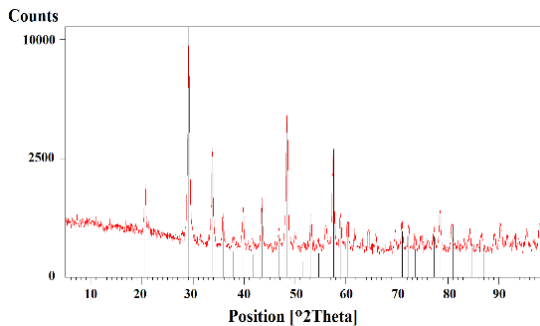
### ۲.۳. مشخصه‌یابی ماده هدف ( $Y_2O_3$ ):

برای داشتن  $Y_2O_3$  فوق‌العاده خالص، این ترکیب از ایزوپروپوکسید ایتیریم سنتز شد. ژل خشک شده در خلاء به دست آمده از فرآیند هیدروترمال، در محدوده دمایی ۲۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد مورد آنالیز حرارتی قرار گرفت. نمودارهای آنالیز حرارتی (TGA) و کالریتری اسکن تفاضلی (DSC) برای ژل در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است. طبق واکنش زیر، ایزوپروپوکسید ایتیریم در راکتور با آب داغ هیدرولیز شده و اکسید ایتیریم حاصل می‌شود:

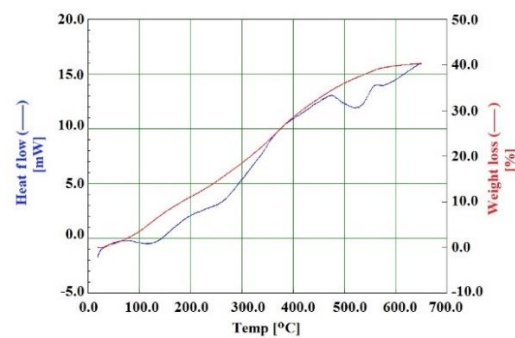


به دلیل مجاورت دمای جوش حلال‌ها در این ژل و دمای واکنش‌های تجزیه حرارتی، کاهش وزن مداوم با شیب تقریباً ثابت وجود دارد. کاهش وزن در مراحل جداگانه مشاهده نشد. کاهش وزن حدود ۶٪، تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد به (۱) ایزوپروپانول تشکیل شده در طول هیدروترمال، (۲) تولوئن در شبکه و (۳) آب جذب شده فیزیکی در نمونه نسبت داده می‌شود. سپس در دماهای بالاتر مرحله تجزیه چند مرحله‌ای آغاز می‌شود. کاهش وزن حدود (۳۴٪) مربوط به فرار گروه‌های آلی  $(-CH_3)_2C-O$  موجود در آئروژل است. الگوی پراش اشعه ایکس پودر نانوبلورهای  $Y_2O_3$  که در شکل ۳ (ب) ارائه شده است نتایج چهار پیک اصلی را نشان می‌دهد. نانوبلورهای  $Y_2O_3$  فاز مکعبی را با ثابت های شبکه  $a = b = c = 10.6080 \text{ \AA}$ ،  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  نشان می‌دهند (ICSD: 080033). متوسط اندازه ذرات محاسبه شده از چهار پیک اصلی پراش با استفاده از معادله شرر حدود ۹/۰۱ نانومتر برای  $NPs Y_2O_3$  کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد است.

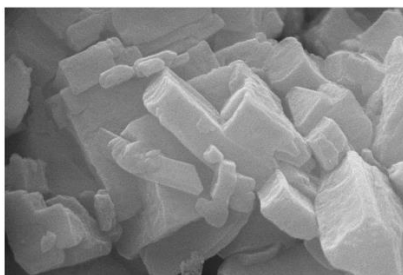
تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانوبلورهای  $Y_2O_3$  در شکل ۳ (ج) نشان داده شده است. اندازه نانوبلورهای  $Y_2O_3$  با مقادیر محاسبه شده از تجزیه و تحلیل XRD سازگاری خوبی دارد. تصویر SEM نشان می‌دهد که نمونه تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار زیادی نانوذرات کروی با مورفولوژی‌های خوشه‌ای آگلومره و فضای خالی کمتر بین نانوذرات در مقایسه با میکروکریستال  $Y_2O_3$  تجاری تشکیل شده است (شکل ۳ (د)).



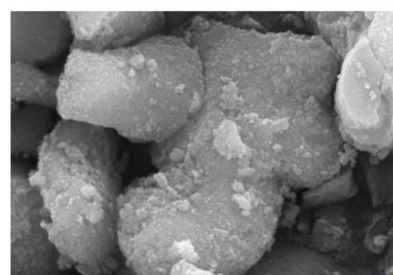
(ب)



(الف)



(د)



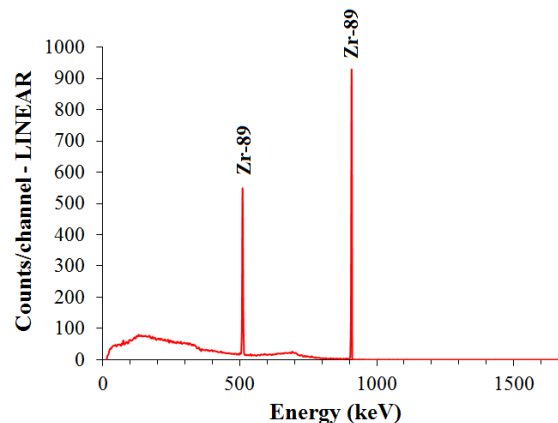
(ج)

شکل ۳. (الف) نمودارهای آنالیز حرارتی (TGA) و گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) نمونه  $Y_2O_3$  NPs، (ب) الگوی پراش پرتو ایکس پودر  $Y_2O_3$  NPs، (ج) تصویر SEM  $Y_2O_3$  NPs، و (د) تصویر SEM نمونه تجاری  $Y_2O_3$ .



### ۳.۳. اندازه‌گیری رادیواکتیویته و کنترل کیفی:

در اغلب متون پژوهشی، واکنش هسته‌ای  $^{89}\text{Zr}(p,n)^{89}\text{Y}$ ، به عنوان مطلوب‌ترین واکنش برای تولید زیرکونیوم-۸۹ نام برده شده است. موسسه علوم رادیولوژی و پزشکی کره با محاسبه سطح مقطع‌ها برای واکنش‌های هسته  $^{86,88,89}\text{Zr}(p,x)\text{Y}$  در سیکلوترون MC50 پیشنهاد کردند که اگر پنجره انرژی ۵ تا ۱۵ MeV باشد تولید رادیویزوتوپ  $^{89}\text{Zr}$  بدون یا دارای حداقل ناخالصی است و حداکثر بازده ۹۵ MBq/ $\mu\text{Ah}$  در پروتون‌های ۱۵ مگا الکترون ولت به دست می‌آید [۱۸]. این نتایج با نتایج ما سازگاری خوبی دارند (۸۷  $\pm$  ۵ MBq/ $\mu\text{Ah}$  در پایان بمباران). طیف اشعه  $\gamma$  نمونه خالص شده  $^{89}\text{Zr}$  با یک آشکارساز HPGGe با وضوح بالا ثبت شد (شکل ۴). فاصله بین منبع اشعه  $\gamma$  و آشکارساز در ۳۰ سانتی متر تنظیم شد. پیک مشاهده شده در ۹۰۹ keV به  $^{89}\text{Zr}$  اختصاص دارد. ناخالصی‌های رادیواکتیو بالقوه برای  $^{89}\text{Zr}$  شامل (۹)  $^{88}\text{Zr}$  برای  $^{89}\text{Zr}$  (۳)  $^{89}\text{Y}$  و (۱۲)  $^{88}\text{Y}$  هستند در طیف گاما مشاهده نشدند. خلوص شیمیایی محصول نهایی با پلاروگرافی آندی پالسی تفاضلی بررسی شد. حد تشخیص سیستم ما برای یون‌های مس و روی ۰/۱ ppm بوده و ناخالصی شیمیایی در محلول نهایی مشاهده نشد. خلوص رادیوشیمیایی [Zr]  $^{89}\text{Zr}$ -oxalate با کروماتوگرافی لایه نازک فوری (ITLC) با استفاده از کاغذ سیلیکاژل به عنوان فاز ثابت و DTPA (pH ۷ و ۵۰ Mm) به عنوان حلال فاز متحرک آنالیز شد.  $^{89}\text{Zr}$ -oxalate [Zr] در نقطه پایه (< ۰.۹۹٪) باقی ماند.



شکل ۴. طیف اشعه گاما نمونه تهیه شده  $^{89}\text{Zr}$ .

### ۵. نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، در این پژوهش یک سیستم هدف ساده و موثر برای تهیه  $^{89}\text{Zr}$  با خلوص رادیونوکلیدی بالا از طریق واکنش هسته‌ای  $^{89}\text{Zr}(p,n)^{89}\text{Y}$  در سیکلوترون سیکلون-۳۰ با استفاده از هدف جدید آبکاری شده با طلا به کار برده شد. بازده تولید رادیویزوتوپ زیرکونیوم-۸۹ از این واکنش هسته‌ای و سیستم هدف بالا بوده و برابر  $87 \pm 5 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$  اندازه‌گیری شد. خلوص رادیونوکلیدی و شیمیایی  $^{89}\text{Zr}$  تهیه شده بیش از ۹۹/۹ درصد تعیین شد. علاوه بر این، یک روش ساده برای تهیه نانو اکسید  $\text{Y}_2\text{O}_3$  فوق‌العاده خالص با استفاده از ایزوپروپوکسید ایتیریم پیشنهاد شد. امید است استراتژی پیشنهادی در این مطالعه بتواند مسیر پیشرفت‌های بالینی آتی برای کاربرد  $^{89}\text{Zr}$  در پزشکی هسته‌ای را تسهیل کند.

### ۶. مراجع

1. Zhang, Y., et al., *Targeting Infiltrating Myeloid Cells in Gastric Cancer Using a Pretargeted Imaging Strategy Based on Bio-Orthogonal Diels–Alder Click Chemistry and Comparison with  $^{89}\text{Zr}$ -Labeled Anti-CD11b Positron Emission Tomography Imaging*. *Molecular Pharmaceutics*, 2022. **19**(1): p. 246-257.
2. Hapuarachchige, S., et al., *Dual-Modality PET-SPECT Image-Guided Pretargeting Delivery in HER2(+) Breast Cancer Models*. *Biomacromolecules*, 2021. **22**(11): p. 4606-4617.

3. Chomet, M., G.A.M.S. van Dongen, and D.J. Vugts, *State of the Art in Radiolabeling of Antibodies with Common and Uncommon Radiometals for Preclinical and Clinical Immuno-PET*. Bioconjugate Chemistry, 2021. **32**(7): p. 1315-1330.
4. Holland, J.P., Y. Sheh, and J.S. Lewis, *Standardized methods for the production of high specific-activity zirconium-89*. Nucl Med Biol, 2009. **36**(7): p. 729-39.
5. Cisternino, S., et al., *Target manufacturing by Spark Plasma Sintering for efficient <sup>89</sup>Zr production*. Nuclear Medicine and Biology, 2022. **104-105**: p. 38-46.
6. Gaja, V., et al., *Production and Semi-Automated Processing of (<sup>89</sup>Zr Using a Commercially Available TRASIS MiniAiO Module*. Molecules, 2020. **25**(11).
7. Zweit, J., S. Downey, and H.L. Sharma, *Production of no-carrier-added zirconium-89 for positron emission tomography*. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes, 1991. **42**(2): p. 199-201.
8. Fazaeli, Y., et al., *A new approach to targetry and cyclotron production of <sup>45</sup>Ti by proton irradiation of <sup>45</sup>Sc*. Nuclear Technology and Radiation Protection, 2014. **29**: p. 28-33.
9. Ellison, P.A., et al., *Spot-welding solid targets for high current cyclotron irradiation*. Appl Radiat Isot, 2016. **118**: p. 350-353.
10. Changqing, L., et al., *Interactions between Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al mixture studied by solid-state reaction method*. Vacuum, 2013. **87**: p. 7-10.
11. Korte, C. and B. Franz, *Reaction kinetics in the system Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – A solid state reaction forming multiple product phases investigated by using thin film techniques*. Solid State Ionics, 2021. **368**: p. 115699.
12. Dabkowski, A., et al., *Optimization of zirconium-89 production in IBA Cyclone 18/9 cyclotron with COSTIS solid target system*. Vol. 1845. 2017. 020005.
13. Koning, A.J., S. Hilaire, and M.C. Duijvestijn. *TALYS: A nuclear reaction program*. in *Int Conf on Nuclear Data for Science and Technology*. 2005. Santa Fe, USA.
14. Ziegler, J.F., J.P. Biersack, and M.D. Ziegler. *The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM Code*. ISBN 0-9654207-1-X, 2008.
15. Wooten, A.L., et al., *Routine Production of <sup>89</sup>Zr Using an Automated Module*. Applied Sciences, 2013. **3**(3): p. 593-613.
16. Lee, J.Y., et al., *Medical radioisotope <sup>89</sup>Zr production with RFT-30 cyclotron*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2021. **330**(2): p. ۴۵۵-۴۶۰.
17. Jauregui-Osoro, M., et al., *Production of copper-64 using a hospital cyclotron: targetry, purification and quality analysis*. Nucl Med Commun, 2021. **42**(9): p. 1024-1038.
18. Khandaker, M.U., et al., *Investigations of <sup>89</sup>Y(p,x)<sup>86,88,89</sup>Zr, <sup>86m+g,87g,87m,88g</sup>Y, <sup>85g</sup>Sr, and <sup>84g</sup>Rb nuclear processes up to 42MeV*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2012. **271**: p. 72-81.