



غنی‌سازی ایزوتوپ ^{90}Zr به روش جداسازی الکترومغناطیسی ایزوتوپ‌ها

هوشیار سیدی*^۱، پروین سرآبادانی^۲، مهدی صادقی^۲، سعید رجبی‌فر^۴

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران - ایران

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸، کرج - ایران

۳. گروه فیزیک پزشکی، دانشکده فیزیک پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، کدپستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۸۳، تهران - ایران

۴. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸، کرج - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۱

چکیده

جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپ‌ها (EMIS) مستقر در کرج قابلیت جداسازی ایزوتوپ‌های دامنه وسیعی از عناصر مختلف را دارا می‌باشد. ایزوتوپ‌های زیرکونیم برای اولین بار در ایران با استفاده از این روش با موفقیت جداسازی شدند. زیرکونیم دارای پنج ایزوتوپ پایدار ^{90}Zr ، ^{91}Zr ، ^{92}Zr ، ^{94}Zr ، ^{96}Zr می‌باشد و فراوانی طبیعی ^{90}Zr ۵۱٫۴۵ درصد است. ایزوتوپ ^{90}Zr برای تولید ^{90}Nb طی واکنش $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ به کار می‌رود که دارای پتانسیل بالا جهت استفاده در نشان‌دار کردن آنتی‌بادی‌ها برای مطالعه تومورها به روش PET می‌باشد. پاکت‌های مسی و صفحه جلویی گرافیتی کلکتور برای ایزوتوپ‌های زیرکونیم، طراحی و ساخته شد. پس از انتخاب ترکیب مناسب ماده اولیه، پارامترهای الکتریکی چشمه‌یونی و الکترومگنت تعیین شدند. طیف جرمی ایزوتوپ‌های زیرکونیم توسط ثبت‌کننده ثبت و جمع آوری انجام شد. ایزوتوپ‌های زیرکونیم انباشت شده در پاکت‌ها ابتدا استخراج و سپس توسط روش‌های الکترولیز و رسوب‌گیری تخلیص گردید. محصول نهایی به صورت ZrO_2 با آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) تأیید شد. خلوص ایزوتوپی ^{90}Zr با طیف‌سنج جرمی (TIMS)، ۹۹٫۲۲ و خلوص شیمیایی به روش پیکسی (PIXE)، ۹۹٫۸۵ تعیین گردید.

کلیدواژه‌ها: تولید ایزوتوپ، زیرکونیم-۹۰، جداسازی الکترومغناطیسی ایزوتوپ، نئونیم-۹۰

Enrichment of ^{90}Zr by Electromagnetic Isotope sSeparation (EMIS)

H. Seyedi*^{1,2}, P. Sarabadani², M. Sadeghi³, S. Rajabifar⁴

1. Department of Physics, Payame Noor University, P.O.Box: 19395-3697, Tehran – Iran

2. Physics and Accelerator Research School, Nuclear Sciences and Technology Research Institute, P.O.Box: 31485-498, Karaj – Iran

3. Medical Physics Department, School of Medicine, Iran University of Medical Sciences, Postalcode: 14155-6183, Tehran – Iran

4. Radiation Application Research School, Nuclear Sciences and Technology Research Institute, P.O.Box: 31485-498, Karaj -Iran

Research Article

Received 9.10.2019, Accepted 11.1.2020

Abstract

The Electromagnetic Isotopes Separator (EMIS) installed in Karaj, has the capability to separate isotopes in a wide range of elements. Zirconium is successfully separated using this method for the first time in Iran. Zirconium element has five stable isotopes, ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{94}Zr , and ^{96}Zr , and the natural abundance of ^{90}Zr is 51.45%. The ^{90}Zr isotope is used to produce radioisotope ^{90}Nb via $^{90}\text{Zr}(p, n)^{90}\text{Nb}$ that has a high potential for antibody labeling application in PET as a radionuclide. Copper pockets and graphite front plate were designed and fabricated for separating and collecting of Zr isotopes. After choosing the appropriate composition for the initial material, the electrical parameters of the ion source and electromagnet were determined. The mass spectra of Zirconium isotopes were recorded. Deposited ^{90}Zr isotopes were first extracted from the copper pocket and then purified by electrodeposition and purification methods. The formation of $^{90}\text{ZrO}_2$ was confirmed by X-ray diffraction (XRD). Chemical purity and isotope purification of ^{90}Zr isotope were 99.22% and 99.85%, which measured by TIMS and PIXE method analysis, respectively.

Keywords: Isotope Production, Zr-90, Electromagnetic Isotope Separation, Nb-90

*Email: hseyedi@nrcam.org

۱. مقدمه

دارای پنج ایزوتوپ پایدار، ^{90}Zr ، ^{91}Zr ، ^{92}Zr ، ^{94}Zr و ^{96}Zr بوده که به ترتیب دارای فراوانی طبیعی ۵۱/۴۵، ۱۱/۳۲، ۱۷/۱۹، ۱۷/۲۸ و ۲/۷۶ درصد می‌باشد. یکی از کاربردهای ایزوتوپ ^{90}Zr ، تولید رادیوایزوتوپ نیوبیم-۹۰ می‌باشد که از رادیوایزوتوپ‌های گسیلنده پوزیترون در روش تصویربرداری PET^۱ است و در پزشکی هسته‌ای برای رصد پادتن‌ها، تشخیص و مطالعات زیستی تومور، توان بالقوه بالایی دارد.

۲. روش انجام کار

۱.۲ مواد

کلرید زیرکونیم به صورت ZrCl_4 با درجه خلوص بالای ۹۸٪ از شرکت MERCK، اسید مندلیک، اسید نیتریک، اسید کلریدریک و هیدرواکسید آمونیم از شرکت MERCK تهیه شدند.

۲.۲ دستگاه‌ها

سیستم جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپ‌ها مدل CI-۱۴۰، دستگاه پراش اشعه ایکس (مدل Stol Stidy-Mp diffractometer X ray source W-Ka)، دستگاه شتاب‌دهنده الکترواستاتیکی و اندوگراف با باریکه پروتون ۲ MeV (PIXE)، دستگاه طیف‌سنج جرمی مدل LZD-۲۰۷ و کوره خلأ از جمله دستگاه‌های مورد استفاده در این کار پژوهشی بودند.

۳.۲ انتخاب و آماده‌سازی ماده اولیه

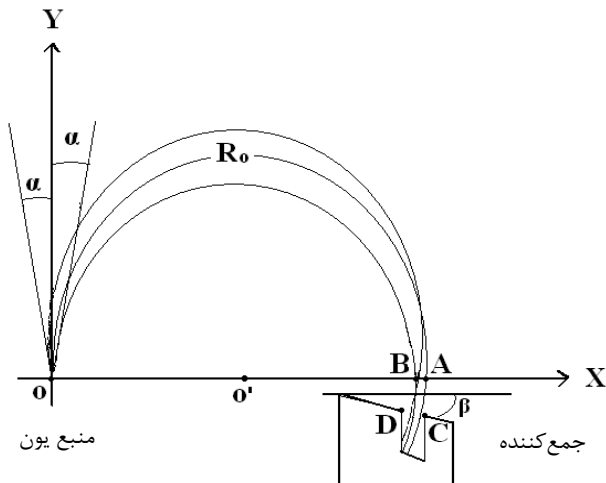
ماده اولیه یک ترکیب شیمیایی از عنصر مورد نظر است که انتخاب آن با توجه به شرایط و محدودیت‌ها در چشمه یونی، کلکتور و فرایند تصفیه شیمیایی، صورت می‌گیرد. ماده اولیه باید دارای خلوص شیمیایی بالا، دمای تبخیری در محدوده ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلیسیوس، پایداری حرارتی در هنگام تبخیر و بدون آب باشد. در صورت امکان از خود عناصر، یا از کلرید و اکسید عناصر می‌توان استفاده نمود. برای غنی‌سازی ^{90}Zr از خود عنصر زیرکونیم به‌عنوان ماده اولیه نمی‌توان استفاده نمود، زیرا زیرکونیم دارای دمای ذوب ۱۸۵۵ درجه سلیسیوس در اتمسفر است که در محدوده دمای کارکرد چشمه یونی کالترن نمی‌باشد. بنابراین از کلرید زیرکونیم با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شد [۹].

جدول ۱. مشخصات ترکیب زیرکونیم به‌عنوان ماده اولیه چشمه یونی

دمای تبخیر (°C)	دمای ذوب (°C)	چگالی (g/cm ³)	فرمول مولکولی
۳۳۱	۴۳۷	۲/۸۰	ZrCl ₄

روش‌های مختلفی مانند روش سانتریفوژ گازی، جداسازی ایزوتوپی لیزری، جداسازی به روش تشدید سیکلوترونی یون‌ها (ICR)، روش سانتریفوژ پلاسما و جداسازی الکترومغناطیسی برای جداسازی ایزوتوپ‌ها وجود دارد. اغلب این روش‌ها برای عناصر دارای تعداد ایزوتوپ پایین بوده و یا جداسازی انتخابی یک ایزوتوپ صورت می‌گیرد و غنای محصول پایین می‌باشد. از روش‌های فوق، روش ICR که بر مبنای تولید پلاسما سیکلوترونی پایه‌ریزی شده است، اکنون به‌عنوان یک روش صنعتی برای طیف وسیعی از ایزوتوپ‌های پایدار مطرح می‌باشد [۱]. از طرفی زیرکونیم به روش سانتریفوژ گازی با غنای بین ۹۰ تا ۹۸ درصد در مقیاس صدها گرم تولید می‌شود [۲]. آزمایشگاه اگریچ، زیرکونیم-۹۰ را به روش جداسازی الکترومغناطیسی ایزوتوپ‌ها با غنای ۹۷ تا ۹۹ درصد جداسازی کرده است [۳]. کاربرد ایزوتوپ‌ها برای تولید رادیوایزوتوپ‌های دارویی در پزشکی به غنای بالایی نیاز دارد تا تولید هسته‌های پرتوزای ناخواسته به حداقل برسد. غنی‌سازی ایزوتوپ‌ها به روش جداسازی الکترومغناطیسی، از روش‌هایی است که می‌توان ایزوتوپ‌هایی با درجه خلوص بسیار بالا تولید کرد. از مزایای این روش، می‌توان به جداسازی هم‌زمان ایزوتوپ‌ها، یک مرحله‌ای بودن و خلوص ایزوتوپی بالای ۹۷ درصد اشاره نمود [۴]. در این روش ابتدا اتم‌های عنصر مورد نظر در چشمه یونی کالترن بعد از تبخیر حرارتی، به روش برخورد الکترونی، یونیزه شده و با انرژی ثابت وارد میدان مغناطیسی یکنواخت می‌شوند و تحت تأثیر میدان مغناطیسی، میسر نیم‌دایره را می‌پیمایند. با توجه به ثابت بودن انرژی یون‌ها و شدت میدان مغناطیسی، شعاع مسیر برای جرم‌های مختلف متفاوت بوده و در انتهای مسیر یون‌های ایزوتوپ‌های مختلف از هم تفکیک و در پاکت‌های مجزا جمع‌آوری می‌شوند. چشمه یونی و کلکتور به محفظه خلأ که تحت میدان مغناطیسی ثابت قرار گرفته است متصل می‌باشد، محفظه با استفاده از پمپ‌های روتاری و دیفیوژن به میزان 10^{-3} پاسکال خلأ می‌شود، بعد از جمع‌آوری در یک دوره کاری، ایزوتوپ‌های موجود در پاکت‌ها، به وسیله فرایند شیمیایی استخراج شده و پس از طی مراحل تصفیه شیمیایی، ایزوتوپ خالص به دست می‌آید. در گذشته جداسازی ایزوتوپ‌های عناصر مختلفی مانند روی، نیکل، استرانسیم، تالیوم، مس، مولیبدن، آهن، ساماریم و . . . انجام شده و محصولات آن‌ها در مراکز مربوط به تولید رادیوداروها و صنایع به کار گرفته شده‌اند [۵-۸].

با استفاده از این روش، غنی‌سازی ایزوتوپ ^{90}Zr برای نخستین بار در ایران با موفقیت انجام شد. عنصر زیرکونیم



شکل ۱. مسیر طی شده یک ایزوتوپ در میدان مغناطیسی.

جدول ۲. مختصات پاکت‌های ایزوتوپ‌های زیرکونیم در کلکتور

ایزوتوپ‌های زیرکونیم	^{90}Zr	^{91}Zr	^{92}Zr	^{94}Zr	^{96}Zr
درصد فراوانی	۵۱٫۴۵	۱۱٫۳۲	۱۷٫۱۹	۱۷٫۲۸	۲٫۷۶
مقدار C_M	۰٫۹۶۷	۰٫۹۷۸	۰٫۹۸۹	۱٫۰۱۱	۱٫۰۳۲
مقدار X(mm)	۲۷۶۷٫۵	۲۷۸۴	۲۸۰۰٫۵	۲۸۳۲٫۴	۲۸۶۱٫۸
مقدار Y(mm)	-۶۶٫۸	-۸۲٫۲	-۱۰۰٫۵	-۱۳۵٫۵	-۱۶۶٫۸

نقشه صفحه جلویی و پاکت‌ها در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به میزان جریانی که به پاکت‌ها می‌رسد، می‌توان در ساخت آن‌ها مواردی از قبیل ضخامت ورقه مسی و لزوم استفاده از خنک‌کننده را در نظر گرفت. برای ایزوتوپ‌های ^{90}Zr ، ^{91}Zr و ^{92}Zr بایستی ضخامت ورق پاکت‌ها ۳ میلی‌متر بوده و هم‌چنین پاکت‌ها بایستی دارای سیستم آب خنک‌کننده باشند. برای پاکت‌های دیگر با جریان دریافتی پایین، ضخامت ورقه مسی ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد که به سیستم خنک‌کننده نیز نیاز ندارند. نمونه پاکت و صفحه جلویی گرافیتی ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵.۲ به دست آوردن شرایط کار

در سیستم جداکننده متغیرهای فیزیکی و الکتریکی زیادی وجود دارد که قبل و هنگام جدا سازی هر عنصر باید محاسبه و تعیین شوند. این متغیرها عبارتند از: ولتاژ شتاب که انرژی یون‌های خروجی از چشمه‌یونی را تعیین می‌کند، ولتاژ متمرکزکننده که به همراه الکتروود شتاب در سیستم لنزی چشمه‌یونی، نقش هم‌گراکننده پرتوهای خروجی را به‌عهده دارند، سیستم کاتدی شامل جریان فیلمان، ولتاژ و جریان کاتد، ولتاژ آند که شدت و انرژی الکترون‌های ساطع شده را کنترل

۴.۲ طراحی و ساخت صفحه جلویی و پاکت‌های ایزوتوپ‌های

زیرکونیم

با توجه به شکل ۱، مسیر پرتوها در میدان مغناطیسی یکنواخت به‌صورت دایره است. بیشینه زاویه واگرایی پرتوها برای هر ایزوتوپ در چشمه یونی α فرض شده است. بنابراین پهنای پرتو برای هر ایزوتوپ بر روی محور X برابر با $AB = 2R_0(1 - \cos \alpha)$ است که در آن شعاع پرتو با زاویه واگرایی صفر می‌باشد. این پهنای در روی کلکتور که با محور X زاویه β می‌سازد برابر با $CD = AB / \cos \beta$ خواهد شد. با توجه به این‌که زاویه α برابر ۵ درجه می‌باشد، برای بهینه کردن پهنای پاکت (CD)، زاویه کلکتور با محور X، ۴۷ درجه در نظر گرفته شده است. CD پهنای مقطع تمرکز پرتو یونی مربوط به هر ایزوتوپ در محل کلکتور است. با توجه به این‌که مقدار R_0 برابر با ۱۴۰۸ میلی‌متر است، CD محاسبه شده برای هر ایزوتوپ ۱۵/۷ میلی‌متر خواهد شد. با در نظر گرفتن فراوانی طبیعی ایزوتوپ ^{90}Zr و با توجه به جریان نسبتاً بالایی که به پاکت می‌رسد، برای دربر گرفتن کل باریکه، پهنای شکاف بر روی صفحه گرافیتی کلکتور در ورودی ۲۰ و خروجی ۲۳ و پهنای پاکت پشت آن ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و برای ایزوتوپ‌های ^{92}Zr و ^{94}Zr پهنای پاکت را ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

مختصات مرکز هر پاکت که از قطع دادن معادلات دایره‌های مربوطه و خط کلکتور محاسبه شده و پارامتر $(C_M = \frac{M}{M_0})$ نسبت جرم هر ایزوتوپ به جرم ایزوتوپ میانی (برای عنصر زیرکونیم با پنج ایزوتوپ پایدار ^{90}Zr ، ^{91}Zr ، ^{92}Zr ، ^{94}Zr ، ^{96}Zr در جدول ۲ نشان داده شده است.

با توجه به جریان یونی پایین برای ایزوتوپ‌های ^{91}Zr و ^{96}Zr ، پهنای پاکت‌ها ۱۸ و ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از طرفی ارتفاع تصویر پرتوها روی صفحه جلویی کوچک‌تر یا مساوی با ۱۷۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین ارتفاع شکاف در صفحه جلویی ۱۹۰ میلی‌متر و به‌منظور جلوگیری از اتلاف پرتو، ارتفاع پاکت‌ها ۲۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا کل پرتو را پوشش دهد. عمق همه پاکت‌ها ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد.

مقدار شدت میدان مغناطیسی حدود ۱۷۱۴ گوس محاسبه شد که لازم است با توجه به مشخصات مگنت جریان سیم پیچ روی ۱۲۳ آمپر تنظیم شود. پارامترهای عملیاتی به دست آمده در جدول ۳ آمده است.

۳. نتایج

۱.۳ جداسازی ایزوتوپهای زیرکونیم

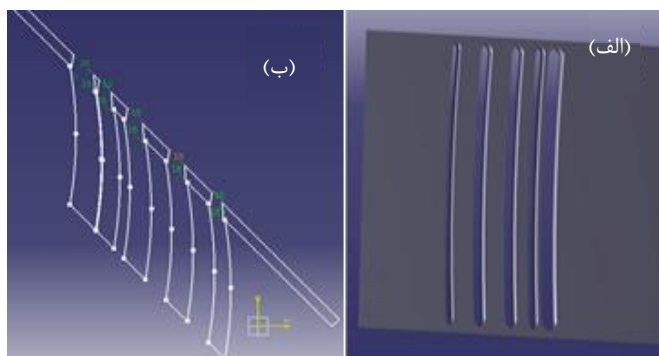
بعد از تنظیم پارامترهای ذکر شده و رسیدن به شرایط مطلوب دریافت ایزوتوپهای تفکیک شده در کلکتور موفقیت آمیز بود. شکل ۴، طیف تفکیک شده ایزوتوپهای زیرکونیم را نشان می دهد که توسط یک فنجان فارادی موجود روی درب کلکتور ثبت شده است. در این فرایند، با تغییر ولتاژ شتاب دهنده و ثابت نگه داشتن میدان مغناطیسی ایزوتوپهای مختلف در داخل فنجان مذکور وارد شده و عمل جداسازی ایزوتوپها و عدم تداخل آنها بررسی شد. بعد از اطمینان از صحت جداسازی، جمع آوری ایزوتوپها در پاکت ها آغاز شد. عمل جمع آوری حدود هفتاد و چهار ساعت با میانگین جریان کل ۵/۲ mA استمرار داشت.

۲.۳ تصفیه شیمیایی ایزوتوپ ^{90}Zr و آنالیزها

از آن جایی که وجود هرگونه ناخالصی در ایزوتوپ پایدار زیرکونیم - ۹۰ منجر به ایجاد واکنش های ناخواسته هسته ای در فرایند تولید رادیوایزوتوپ نیوبیم - ۹۰ در سیلکلوترون می شود، لذا تصفیه شیمیایی ایزوتوپ پایدار زیرکونیم - ۹۰ از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به این که یون های زیرکونیم بر روی سطح پاکت مسی جمع آوری می شوند لذا یون های مس عمده ترین ناخالصی برای زیرکونیم محسوب می شوند که این یون ها با استفاده از روش الکترولیز تحت جریان ثابت ۲ آمپر به صورت مس فلزی بر سطح الکترود پلاتین به عنوان کاتد رسوب داده شده و حذف شدند [۱۰]. الکترولیز تا زایل شدن رنگ آبی مربوط به یون مس ادامه یافت. با توجه به وجود ناخالصی های مختلفی مانند آهن، نیکل، کبالت و کروم ناشی از برخورد پرتو یونی به صفحه جلویی (از جنس استیل (از آلفا) - هیدروکسی فنیل استیک اسید با نام تجاری مندلیک اسید به عنوان رسوب دهنده انتخابی برای یون زیرکونیم استفاده شد [۱۱، ۱۲]. در این روش یون زیرکونیم (IV) به طور انتخابی با مندلیک اسید تحت $\text{pH} = 3$ واکنش داده و رسوب شیری رنگ مندلات زیرکونیم تحت دمای 85°C تشکیل می شود. واکنش تشکیل کمپلکس زیرکونیم (IV) با مندلیک اسید به صورت رابطه ۱ می باشد:



می کنند، فشار بخار در محفظه قوس الکتریکی که نقش تعیین کننده در ایجاد پلازما داشته و توسط هیترهای مربوطه کنترل می شود، اندازه شدت میدان مغناطیسی که بر اساس محاسبات تئوری، منحنی و جداول سیستم [۵] با توجه به ثابت بودن ولتاژ شتاب، مقدار آن برای جرم ایزوتوپ میانی از معادله حرکت ذره $R = (144,5 \sqrt{MV_R}) / B$ تعیین می شود که R شعاع مسیر یون برحسب سانتی متر، B میدان مغناطیسی برحسب گوس، V_R ولتاژ شتاب دهنده (برحسب ولت) و M عدد جرمی یون ها می باشند.



شکل ۲. الف) صفحه گرافیتی جلویی با شکاف های پنج گانه برای پنج ایزوتوپ زیرکونیم و ب) محل قرارگیری پاکت های مسی در پشت صفحه گرافیتی جلویی در کلکتور.



شکل ۳. الف) نمونه پاکت های مسی ساخته شده، ب و ج) نحوه قرارگیری در پشت شکاف های صفحه گرافیتی جلویی در چارچوب کلکتور.

جدول ۳. متغیرهای عملیاتی در هنگام جداسازی ایزوتوپ‌های زیرکونیم

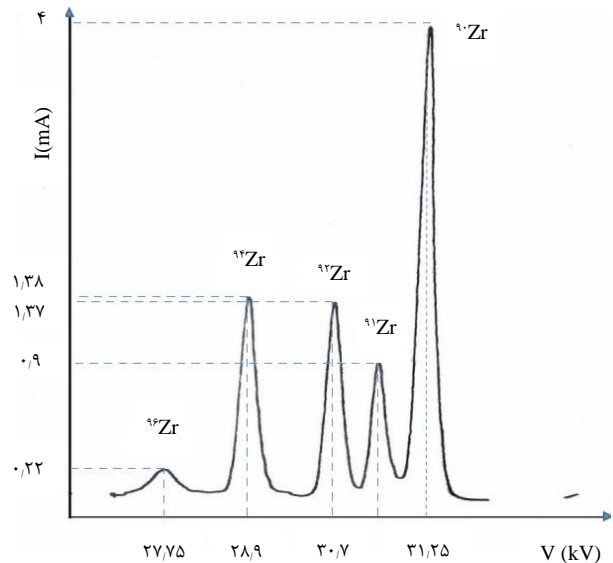
V _{Acc} (kV)	V _{Foc} (kV)	I _{Fi} (A)	V _{Cat} (V)	I _{Cat} (A)	V _{Anode} (V)	I _{Anode} (A)	I _{Mag.} (A)	Vacuum (Pa)	Temp (°C)	I _{Total} (mA)
۳۰٫۸	۱۰٫۲	۶۳	۷۰۰	۰٫۴۸	۱۶۳	۰٫۸۳	۱۲۳	۳×۱۰ ^{-۳}	۱۳۵	۱۱

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای اولین بار در ایران ایزوتوپ‌های زیرکونیم با روش الکترومغناطیسی جداسازی شدند. ماده اولیه به کار رفته، کلرید زیرکونیم با خلوص بالای ۹۸ درصد می‌باشد که قابلیت تبخیر در محدوده دمای کاری چشمه یونی را دارد. خلوص شیمیایی و خلوص ایزوتوپی ^{90}Zr با اندازه‌گیری به روش پیکسی (PIXE) و طیف‌سنجی جرمی به ترتیب ۹۹٫۸۵، ۹۹٫۲۲ درصد تعیین گردید. این نتایج برای زیرکونیم در مقایسه با محصولی که به روش سانتریفیوژ پلاسما، با غنای ۹۰ تا ۹۸ درصد [۲] و آزمایشگاه اکریج [۳] که با همین روش و با غنای بین ۹۷ تا ۹۹ درصد تولید کرده قابل توجه است.

جدول ۴. نتایج مربوط به اندازه‌گیری خلوص شیمیایی به روش (PIXE)

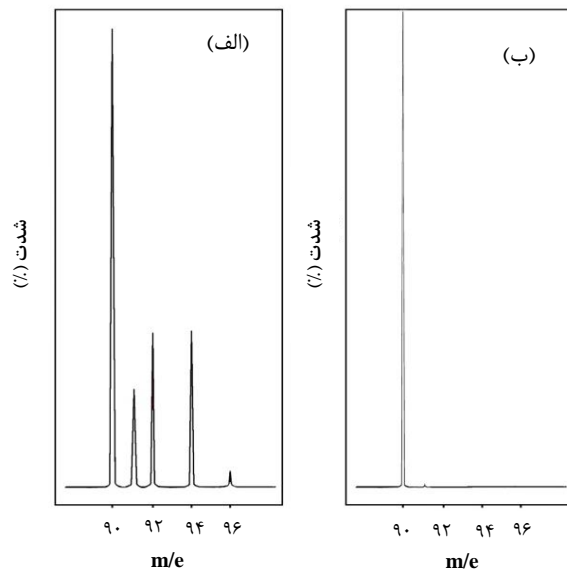
ترکیبات	ZrO _۲	ZnO	Cu _۲ O	Fe _۲ O _۳	CaO
درصد	۹۹٫۸۵	-	-	۰٫۰۵	۰٫۱۰



شکل ۴. طیف ثبت شده توسط ثبت‌کننده به هنگام جاروب ولتاژ شتاب‌دهنده.

با توجه به این‌که محصول نهایی بایستی دارای ترکیب و وزن ثابتی باشد، لذا مندلات زیرکونیم بایستی در کوره در اثر حرارت به اکسید زیرکونیم تبدیل شود. مطالعات وزن‌سنجی حرارتی انجام شده روی مندلات زیرکونیم توسط استاچسکو و همکارانش [۱۲] نشان داد که یک کاهش شدید جرم از ۲۰۰ تا ۳۰۰ °C و یک کاهش متوسط تا ۵۵۰ °C و سپس یک کاهش آهسته‌تر تا دمای ۷۰۰ °C و در نهایت یک کاهش سریع تا ۹۵۹ °C تا حصول وزن ثابت روی می‌دهد [۱۳]، لذا مندلات زیرکونیم در کوره تحت دمای ۱۰۰۰ °C به مدت ۶ ساعت حرارت داده شد. تحت این شرایط، مندلات زیرکونیم به اکسید زیرکونیم، به صورت یک ترکیب پایدار و قابل توزین، تبدیل شد. تشکیل اکسید زیرکونیم-۹۰ توسط روش پراش اشعه ایکس مورد تأیید قرار گرفت که با شماره کارت مرجع ۰۴۲۰-۰۳۶-۰۰ مطابقت داشت.

جدول ۴ نتایج مربوط به اندازه‌گیری خلوص شیمیایی و شکل ۵ طیف مربوط به خلوص ایزوتوپی ^{90}Zr را نشان می‌دهد.



شکل ۵. طیف به دست آمده از طیف‌سنجی جرمی، الف) زیرکونیم طبیعی و ب) غنی شده.

1. J.M. Dawson, *Isotope separation in plasmas by use of Ion Cyclotron Resonance*, *Phys. Rev. Lett.* **37**(23), 1547 (1976).
2. H. Schmeing, W.J.L. Buyers, G. Dolling, *Isotope Enrichment in Zirconium with a Plasma Centrifuge, Final report on contract CR31-3946, Chalk River Nuclear Laboratories, Atomic Energy of Canada*, (June 1983).
3. W.A. Bell, J.G. Tracy, *Stable Isotope inventory requirements and enrichment capabilities*, *Oak Ridge National Laboratory, USA*, (December 1985).
4. J. Koch, *Electromagnetic Isotope Separators and Application of Electromagnetically Enriched Isotopes*, (*Interscience Publishers, New York*, 1958).
5. A.J. Novinrooz, et al., *Separation of Thallium Isotope (^{203}Tl) by 180° Electromagnetic Isotope Separator*, *J. Nucl. Sci. Tech. AEOI*, **28** (1382) (In Persian).
6. J. Garousi, et al., *Recovery of Mo-98 Enriched Stable Isotope from Graphite Collector of EMIS and Chemical Purification*, *J. Nucl. Sci. Tech. AEOI*, **37** (1385) (In Persian).
7. Z. Asadollahi, et al., *Enrichment of Fe-54 by Electromagnetic Isotope Separator (EMIS)*, *J. Nucl. Sci. Tech., AEOI*, **66** (1392) (In Persian).
8. S.M. Mohati, *Enrichment of ^{58}Ni by electromagnetic isotope separator*, *5th International conference on isotopes, Brussels (Belgium)*, April 25-29 (2005).
9. C.W. Sheridan, H.R. Gwinn, L.O. Love, *Preparation of Charge Materials for ORNL Electromagnetic Isotopes separator*, *ORNL- 3301* (Aug 8, 1962).
10. P. Sarabadani, et al., *Chemical recovery and purification of ^{203}Tl stable isotope enriched by using an electromagnetic isotope separator*, *Journal of Labeled compounds and Radiopharmaceuticals*, **50**, 5-6 (2007).
11. B. Weaver, *Chemical refinement procedure in the electromagnetic separation of isotopes*, *Oak Ridge National Laboratory*, W-7405-eng-26, (1955).
12. G. Norwitz, *Determination of Zirconium in Zirconium Metal and Zirconium Powder by Use of Mandelic Acid*, *Analytica Chimica Acta*, **35**, 491-498 (1966).
13. J. Stachtchenko, C. Duval, *Sur la thermogravimétrie des précipités analytiques Dosage du zirconium*, *Analytica Chimica Acta*, **5**, 410-421 (1951).