

فصل اول: پیشگفتار

۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ رادیونوکلئیدها در پزشکی.....
۳	۳-۱ معرفی PET.....
۵	۴-۱ زیرکونیوم-۸۹ به عنوان رادیونوکلئید در نشاندار سازی آنتی بادیها.....
۵	۵-۱ تولید رادیونوکلئید $^{89}\text{Zr}$ .....
۷	۶-۱ هدف از این تحقیق.....

فصل دوم: تعیین پارامترهای تولید زیرکونیوم-۸۹

۹	۱-۲ اسطح مقطع.....
۱۰	۲-۲ معرفی کدهای محاسباتی ALICE-91 و TALYS1.0.....
۱۲	۳-۲ بررسی سطح مقطع (احتمال واکنش) زیرکونیوم - ۸۹ از طریق واکنشهای مختلف.....
۱۴	۱-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$ .....
۱۶	۲-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{nat}\text{Sr}(\alpha, xn)^{89}\text{Zr}$ .....
۱۸	۳-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{nat}\text{Zr}(p, pxn)^{89}\text{Zr}$ .....
۲۰	۴-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{89}\text{Y}(d, 2n)^{89}\text{Zr}$ .....
۲۲	۵-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$ .....
۲۴	۴-۲ محاسبه ضخامت هدف.....
۲۴	۱-۴-۲ توان ایستاندگی.....
۲۹	۵-۲ محاسبه بهره‌ی تولید زیرکونیوم-۸۹.....

فصل سوم: طراحی هدف به منظور تولید زیرکونیوم-۸۹

۳۲	۱-۳ طراحی هدف.....
۳۴	۲-۳ ضخامت هدف.....

## فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
۳-۳ لوازم مورد نیاز برای تهیهی هدف.....	۳۵
۱-۳-۳ تهیهی هدف .....	۳۷
۲-۳-۳ تهیهی سوسپانسیون .....	۳۸
۴-۳ نتایج حاصل از کنترل کیفی هدف.....	۴۱
۵-۳ نمونهی نهایی .....	۴۳

### فصل چهارم: بمباران هدف و تلخیص زیرکونیم-۸۹

۱-۴ بمباران پروتونی هدف.....	۴۵
۲-۴ نتایج محاسبات بهره ی تولید زیرکونیم-۸۹.....	۴۶
۳-۴ تعیین واکنش بهینه.....	۴۶
۴-۴ نتایج حاصل از اندازه گیری پرتوزایی و بهره ی تولید .....	۴۷
۵-۴ بازیابی زیرکونیم از ایتريم با روش تبادل یونی .....	۵۱
۶-۴ کنترل خلوص رادیو ایزوتوپی .....	۵۱
۷-۴ کنترل خلوص شیمیایی.....	۵۲

### فصل پنجم: نتیجه گیری

۱-۵ نتیجه گیری .....	۵۴
۲-۵ پیشنهادات.....	۵۶
فهرست منابع.....	۵۷

# فصل ۱

## پیشگفتار

## ۱-۱ مقدمه

امروزه رادیوایزوتوپها نقشی مهم و فزاینده در زندگی بشری ایفا می‌کنند و کاربرد های وسیعی در بسیاری از رشته ها و زمینه ها دارند. رادیوایزوتوپها به طور گسترده در پزشکی، صنعت، کشاورزی و تحقیقات علمی استفاده شده و کاربرد های جدید آنها دائماً در حال گسترش و توسعه است. در بسیاری از موارد، جایگزینی برای رادیوایزوتوپها وجود نداشته و در بیشتر کاربردها نسبت به تکنیک ها و روش های دیگر بهتر و ارزانتر هستند.

بیش از هشتاد سال از اولین آزمایش پزشکی هسته ای با رادیوایزوتوپ طبیعی  $^{226}\text{Ra}$  در سال ۱۹۲۷ می‌گذرد. گئورگ دی هوسی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۳ میلادی اولین کسی بود که از رادیوایزوتوپ ها به عنوان ردیاب در تکنیک تصویر برداری استفاده کرد [۱]. اما تنها در چند دهه اخیر است که پزشکی هسته ای به عنوان یک تخصص پزشکی شناخته می‌شود. پیشرفت های اخیر در زمینه ی تولید رادیوداروهای شیمیایی از یک سو و گسترش و توسعه تکنیک های تصویر برداری و درمانی از سوی دیگر باعث استفاده روزافزون از این فن آوری در تشخیص و درمان بیماری ها شده است.

## ۲-۱ رادیونوکلئید ها در پزشکی

روشهای استفاده از نوکلئید های پرتوزا در پزشکی را می‌توان به سه دسته بزرگ تقسیم کرد؛ که یکی از این بخش ها، روش های تشخیصی است. برای نمونه، تصویربرداری از اعضای بدن که در آن یک رادیونوکلئید با ترکیب شیمیایی مناسب را به بیمار تجویز می‌کنند و توزیع ماده ی پرتوزا را به وسیله ی یک آشکارساز تابش از خارج بدن تعیین می‌کنند. در پزشکی هسته ای تشخیصی، برای فراهم کردن اطلاعات درباره بدن انسان و عملکرد ارگان های مشخص، فرایند های بیولوژیکی در حال پیشرفت و یا وضعیت و چگونگی یک بیماری خاص، از مقدار کم تابش استفاده می‌کند.

---

<sup>۱</sup>George de Hevesy

یک بخش دیگر از کاربرد های رادیونوکلوئید ها، مربوط به کاربرد درمانی نوکلوئید های پرتوزا است. در سومین بخش پزشکی هسته ای که هر روز بر اهمیت آن افزوده می شود، ماده ی رادیونوکلوئید پرتوزا به بیمار تجویز نمی شود، بلکه از تکنیک های آن برای اندازه گیری غلظت هورمون ها، پادتن ها، داروها و سایر موارد مهم در نمونه ی خونی یا نمونه ی بافت استفاده می شود [۳،۲].

### ۳-۱ معرفی PET (Positron Emission Tomography)

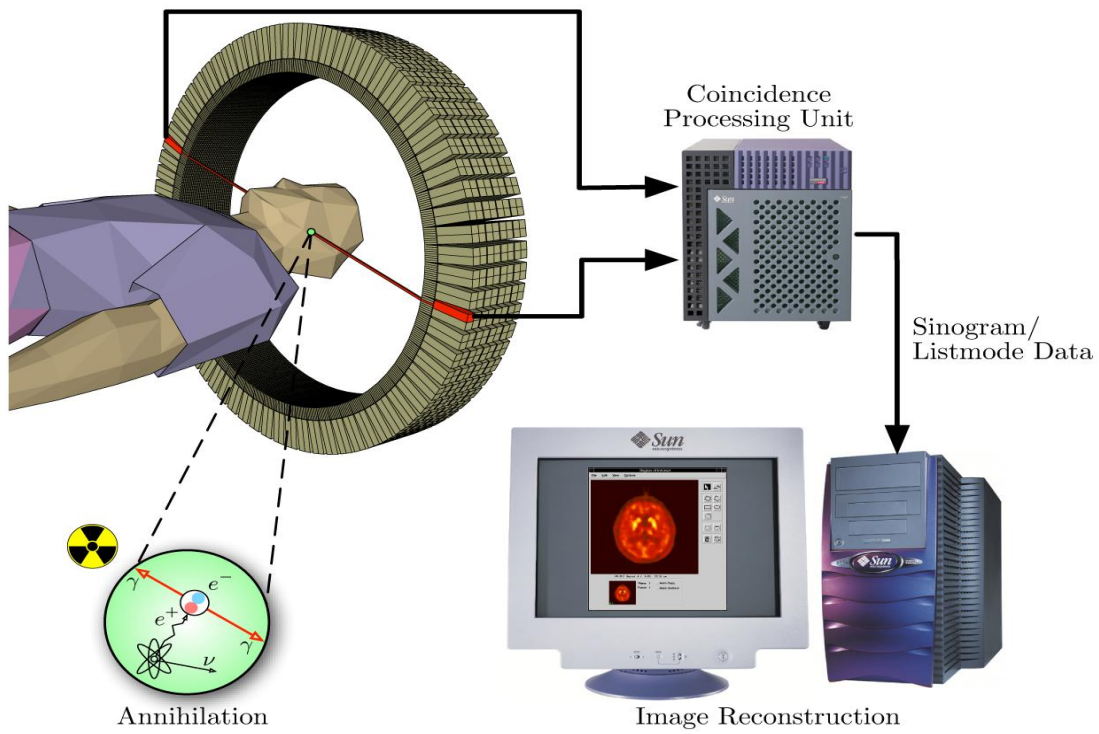
تصویر برداری PET دارای دقت، حساسیت و کیفیت بالایی است. این روش توسط تریپوگوسین<sup>۱</sup> و همکارانش در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد [۵،۴]. در این نوع تکنیک تصویربرداری عناصر بیولوژیکی مانند ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ) و رادیوها لوزن هایی مانند ( $^{18}\text{F}$ ,  $^{76}\text{B}$ ,  $^{124}\text{I}$ ) و رادیو فلزاتی مانند ( $^{88}\text{Y}$ ,  $^{88}\text{Zr}$ ,  $^{89}\text{Zr}$ ) با توجه به نیمه عمر و انرژی پرتو گسیل دهنده و خصوصیات شیمیایی برای گسیل پوزیترون استفاده می شوند [۶،۵]. PET می تواند اثرات دینامیکی مثل جریان خون را ردیابی، مشخص و ثبت نماید [۷]. در PET رادیونوکلوئید های تابش کننده پوزیترون، اشعه گاما تشعشع نمی کنند بلکه پوزیترون انرژی اش را در اثر برهم کنش با محیط اطراف در طی مسافت کوتاهی از محل تولید از دست می دهد و از ترکیب با یک الکترون، به طور هم زمان دو پرتو گاما با انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون ولت تولید می کند. این دو پرتوی گاما در جهت خلاف هم ( $180^\circ$ ) حرکت می کنند. طراحی شماتیک از دستگاه PET و نابودی زوج الکترون و پوزیترون در شکل ۱-۱ و ۲-۱ نشان داده شده است. بیشترین کاربرد PET در زمینه تومورشناسی<sup>۲</sup>، قلب شناسی<sup>۳</sup> و عصب شناسی<sup>۴</sup> است [۹،۸].

<sup>1</sup>Ter-Pogossian

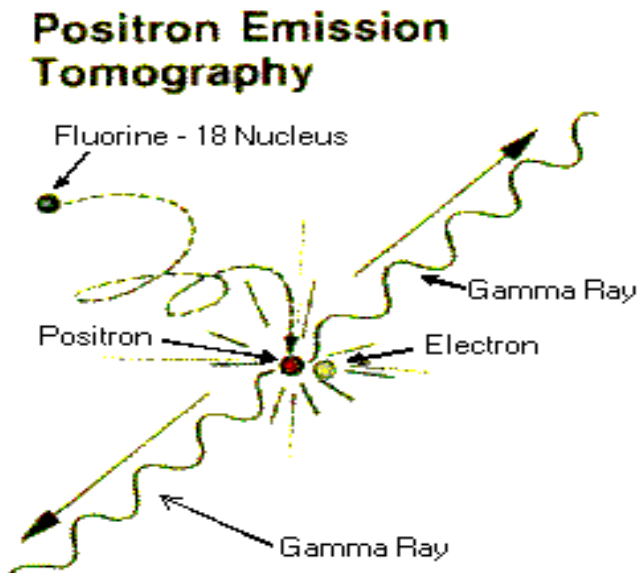
<sup>2</sup> Oncology

<sup>3</sup> Cardiology

<sup>4</sup> Neurology



شکل ۱-۱ طراحی شماتیک از دستگاه PET



شکل ۲-۱ نابودی زوج الکترون و پوزیترون

## ۴-۱ زیرکونیوم-۸۹ به عنوان رادیونوکلئید در نشاندار سازی آنتی بادیها

رادیونوکلئید هایی وجود دارند که کار بردشان در اکثر شاخه های علم و تکنولوژی به ویژه در زمینه‌ی پزشکی در حال افزایش است. رادیونوکلئید هایی که دارای عمر کوتاهی هستند مثل کربن-۱۱ با نیمه عمر ۲۰/۳ دقیقه، اکسیژن-۱۵ با نیمه عمر ۲/۰ دقیقه و آهن-۱۸ با نیمه عمر ۱۱۰ دقیقه که  $\beta^+$  تابش می کنند، اغلب در تکنولوژی PET مورد استفاده قرار می گیرند.

برای مطالعه فرایند های متابولیک کند، Long-term kinetics و Bio distribution of antibodies تابش کننده های  $\beta^+$  با نیمه عمر طولانی لازم است. زیرکونیوم-۸۹ یکی از آنها می باشد که توسط برین<sup>۱</sup> و لینک<sup>۲</sup> به عنوان مناسب ترین تابش کننده پوزیترون برای لیبلینگ آنتی بادیها پیشنهاد شد. این رادیونوکلئید همچنین با داشتن نیمه عمر ۷۸/۴۱ ساعت و ۲۳٪ تابندگی پوزیترون برای لیبلینگ مونوکلونال آنتی بادیها برای تصویر برداری تومور مورد استفاده قرار می گیرد [۱۰].

## ۵-۱ تولید رادیونوکلئید زیرکونیوم-۸۹

$^{89}\text{Zr}$  امروزه عمدتاً به صورت واکنش  $^{89}\text{Zr} (p, n) ^{89}\text{Y}$  با بمباران فلز ایتیریم در سیکلوترون تولید می شود [۱۱]. از پودر اکسید ایتیریم نیز به صورت قرصهای پرس شده جهت تولید زیرکونیوم-۸۹ استفاده شده است، اما پودر اکسید ایتیریم به صورت چسپاندن بر روی زیر لایه‌ی مسی هرگز استفاده نشده است. مزیت این روش نسبت به روشهای قبلی در این است که اولاً پودر اکسید ایتیریم نسبت به فلز ایتیریم ارزان است، دوماً وقتی اکسید ایتیریم با چسپ بر روی مس چسپانده می شود در مقابل افزایش جریان پروتونی استحکام لازم را دارد در نتیجه با افزایش

<sup>1</sup> Brien

<sup>2</sup> Link

جریان پروتون بهره‌ی تولید بالا می‌رود بنابراین پیشنهاد تولید زیرکونیوم-۸۹ با استفاده از چسپاندن پودر اکسید ایتیریم بر روی مس جهت بمباران در سیکلوترون که تولیدات بدون ناخالصی دارد جالب به نظر می‌رسد.

برای بررسی تولید زیرکونیوم-۸۹، هدف‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری سطح مقطع، توسط سیکلوترون بمباران شده‌اند. اودین و همکارانش سطح مقطع واکنش  $^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$  را تا انرژی بیش از ۷۹ مگا الکترون ولت اندازه‌گیری کرده‌اند [۱۲]. لینک و همکارانش با بمباران قرصهای اکسید ایتیریم پرس شده توسط پروتون، بهره‌ی تولید را ۲۸۰ مگا بکرل به دست آوردند [۱۳]، افراد دیگری نیز برای تولید زیرکونیوم-۸۹ از راه‌های مختلف تلاش کرده‌اند به طوری که اودین و همکارانش با بمبارن پروتونی زیرکونیوم طبیعی تا انرژی ۴۰ مگا الکترون ولت اقدام به اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش  $^{89}\text{Zr}(p, pxn)^{\text{nat}}\text{Zr}$  کردند [۱۴]. استرانسیم طبیعی نیز برای اندازه‌گیری سطح مقطع توسط آلفا تا انرژی بیش از ۳۰ مگا الکترون ولت بمباران شده است [۱۵]. فانگ با استفاده از واکنش  $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$  اقدام به اندازه‌گیری سطح مقطع کرد [۱۶]. برای جداسازی زیرکونیوم از ایتیریم پیش از این در زمینه‌ی هسته‌ای کاری صورت نگرفته بود. اما در زمینه‌ی شیمی برای جداسازی زیرکونیوم از ایتیریم روشهای مختلفی انجام شده است. از جمله روشهای به کار برده شده برای جداسازی، روش تبادل یونی و استخراج حلالی هستند [۱۰، ۱۱]. اگرچه داده‌های عملی اینچنین، در مراحل اولیه‌ی توسعه‌ی یک فرایند تولید رادیوایزوتوپ مفید است، اما برای بهینه‌کردن روش تولید به داده‌های پایه‌ای سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای نیاز است.

در نهایت پنج روش مهم برای تولید زیرکونیوم-۸۹ وجود دارد:

۱- واکنش  $^{89}\text{Y}$  با پروتون

۲- واکنش  $^{89}\text{Y}$  با دوترون

۳- واکنش  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  با پروتون

۴- واکنش  $^{\text{nat}}\text{Sr}$  با آلفا

۵- واکنش  $^{90}\text{Zr}$  با نوترون



## ۱-۶ هدف از این تحقیق

همانطور که اشاره شد، پتانسیل بالای استفاده از زیرکونیوم-۸۹ در PET، ما را بر آن داشت که برای اولین بار در کشور امکان تولید این رادیوایزوتوپ را با توجه به امکانات موجود داخلی مورد بررسی قرار دهیم.

در این تحقیق ابتدا برای انتخاب واکنش مناسب و پارامترهای بهینه‌ی تولید، به بررسی سطح مقطع تولید واکنش‌های مختلف می‌پردازیم.

این داده‌های هسته‌ای به وسیله‌ی استفاده از مدل‌های گوناگون واکنش هسته‌ای در دامنه‌های مختلف انرژی ذره‌ی ورودی و برای هسته‌ها و پرتابه‌های مختلف، به وسیله کد‌های هسته‌ای که برای این منظور نوشته شده‌اند، تولید شده است.

کدهای مختلفی (ALICE/ASH, ALICE-91, TALYS, EMPIRE, GNASH) برای تولید داده‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند. که در نهایت کدهای ALICE-91 و TALYS-1.0 برای این منظور انتخاب شدند. بعد از محاسبه‌ی سطوح مقطع و بهره‌ی تولید واکنش‌های مورد نظر، واکنش مناسب، با توجه به امکانات موجود، انتخاب و شرایط بهینه‌ی تولید پیدا می‌شد.

در مرحله‌ی بعد با توجه به شرایط بهینه، طراحی هدفی که بتواند این شرایط را ایجاد کرده و در عین حال مقاومت بالایی در برابر اثرات مخرب تابش داشته باشد، انجام می‌شود. آزمایشات متعددی برای توسعه روش رسوب‌نشانی در طراحی این هدف و کنترل کیفی آن انجام گرفت.

در پایان برای بررسی مقاومت هدف در شرایط واقعی و اندازه‌گیری میزان بهره‌ی تولید زیرکونیوم-۸۹، نمونه‌ای را توسط سیکلوترون موجود در پژوهشگاه تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج به مدت ۲۰ دقیقه مورد تابش پروتون با انرژی ۱۵ مگا الکترون ولت و جریان ۲۰ میکرو آمپر قرار دادیم. در این تحقیق از روش تبادل یونی، با استفاده از اسید کلریدریک (HCl) به عنوان حلال، استفاده شد.

## فصل ۲

تعیین پارامترهای

تولید زیر کونیوم - ۸۹

## ۱-۲ سطح مقطع<sup>۱</sup>

احتمال وقوع یک واکنش هسته ای را می توان به نحو مطلوبی برحسب مفهوم سطح مقطع بیان کرد. در واقع، سطح مقطع معیاری است که احتمال نسبی وقوع واکنش را نشان می دهد.

هرگاه باریکه ای از ذرات تک انرژی با شار  $I_a$  ذره در واحد زمان در واحد سطح، به طور یکنواخت بر هدفی که شامل  $N$  هسته ی هدف در واحد سطح است، برخورد کند و ذرات خروجی نیز با آهنگ  $R_b$  ظاهر شوند، در این صورت سطح مقطع واکنش بصورت زیر تعریف می شود.

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a \cdot N} \quad (1-2)$$

با این تعریف  $\sigma$ ، دارای بعد سطح و واحد بارن ( $1b=10^{-24} \text{ cm}^2$ ) است.

در حالت کلی تر، یک ذره ی پرتابه و هسته ی مفروض می توانند به طرق مختلف واکنش کنند و محصولات گوناگونی را تولید کنند. به این طرق مختلف اصطلاحاً کانال واکنش گفته می شود.

مجموع تمامی سطح مقطع های کانال های مختلف یک واکنش را سطح مقطع کل واکنش می نامیم.

در تولید رادیوایزوتوپ ها معمولاً از کمیت سطح مقطع تولید<sup>۲</sup> (سطح مقطع مجموع<sup>۳</sup>) استفاده می شود که به صورت زیر تعریف می شود:

مجموع سطح مقطع های همه ی کانال های مختلف واکنش که بر روی یک هسته ی هدف رخ می دهند و منجر به تولید مستقیم<sup>۴</sup> هسته ی نهایی مفروض می شوند.

<sup>۱</sup> Cross Section

<sup>۲</sup> Production cross section

<sup>۳</sup> Integral cross section

<sup>۴</sup> Direct production

توجه به این نکته ضروری است که در برخی واکنش ها، ممکن است که هسته‌ی نهایی مفروض، از واپاشی هسته‌هایی که در فرایند واکنش تولید شده‌اند، ایجاد شود. به این فرایند، تولید غیرمستقیم گفته می‌شود.

در بیشتر موارد، جدا کردن فرایند تولید مستقیم و غیرمستقیم هسته‌ی مفروض، اهمیت ندارد. در این شرایط سطح مقطع تولید انباشته<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت حاصل جمع هر دوی این فرایندها تعریف می‌شود.

در صورتی که ماده‌ی هدف، به طور طبیعی دارای چندین ایزوتوپ مختلف باشد و کانال‌های مختلف در آنها به تولید یک رادیوایزوتوپ نهایی یکسان منجر شود، مسئله پیچیده‌تر می‌شود. در این صورت سطح مقطع تولید انباشته هر ایزوتوپ را با توجه به نسبت فراوانی هر ایزوتوپ با هم جمع می‌کنیم و کمیتی با عنوان سطح مقطع تولید عنصری<sup>۲</sup> بدست می‌آید.

به طور کلی در انواع سطح مقطع‌های تولید، هسته نهایی مورد توجه است.

به این نکته نیز اشاره می‌شود که، منحنی سطح مقطع واکنش به عنوان تابعی از انرژی پرتابه را، تابع برانگیختگی<sup>۳</sup> می‌نامند.

## ۲-۲ معرفی کدهای محاسباتی TALYS-1.0 و ALICE-91

کدهای مختلفی نظیر GROGI, STAPRE, ALICE, TALYS, GNASH, SPEC و اصلاحاتشان بر اساس مکانیسم واکنش تعادل و پیش از تعادل توسعه یافته‌اند. این کدها از نظر فیزیکی مشابه بوده و تفاوت‌هایی در پیچیدگی تهیه‌ی داده‌های ورودی و زمان لازم برای محاسبه دارند [۱۷].

<sup>۱</sup> Cumulative production cross section

<sup>۲</sup> Elemental production cross section

<sup>۳</sup> Excitation function

یکی از این کد ها، کد ALICE بوده که به منظور بررسی و مطالعه‌ی واکنش های هسته ای توسط بلان<sup>۱</sup> و همکارانش عرضه شده است [۱۷]. اولین برنامه‌ی آن به منظور تحلیل توابع برانگیختگی در سال ۱۹۶۲ در دانشگاه روچستر، روی کامپیوتر IBM اجرا شد. آخرین ویرایش آن ALICE/ASH است که در سال ۲۰۰۶ توسط برودرز<sup>۲</sup> و همکاران اصلاح شده است [۱۸]. نسخه‌ی در دسترس این کد که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته ALICE-91 است. اصل برنامه نسخه ALICE-91 به زبان فرترن ۷۷ در حدود ۶۷۰۰ خط نوشته شده است. این کد قادر به محاسبه‌ی سطح مقطع دیفرانسیلی برای ذرات خروجی نوترون و پروتون و نیز سطح مقطع انواع تولیدات نوترون، پروتون، دوترون، آلفا و محصولات شکافت است. همچنین قادر به انجام محاسبات مربوط به طیف اشعه  $\gamma$  و نیز توزیع زاویه‌ای گسیل  $n$  و  $p$  است. حداکثر انرژی ورودی پرتابه در کد نزدیک به ۳۰۰ MeV است. محور اساسی محاسبه‌ی سطح مقطع در کد آلیس در حوزه واپاشی هسته مرکب یا هسته باقیمانده تعادل یافته، مدل تبخیری وایسکوف<sup>۳</sup> و در حوزه واپاشی هسته‌ی مرکب پیش از تعادل، مدل هایبریدی<sup>۴</sup> و مدل وابسته هندسی هایبرید است [۱۷, ۱۸].

کد محاسباتی TALYS-1.0 یک برنامه‌ی کامپیوتری برای واکنش های هسته ای است که در NRG Petten فرانسه تهیه شده است. این کد قادر به شبیه سازی واکنش های هسته ای با ذره‌ی پرتابه‌ی نوترون، فوتون، پروتون، دوترون، تریتون،  $^3\text{He}$  و آلفا، در بازه‌ی انرژی ۱ کیلو الکترون ولت تا ۲۰۰ مگا الکترون ولت برای هسته‌هایی با جرم حداقل ۱۲ است. فایل ورودی کد تالیس تنها به ۴ داده (واژه کلیدی) نیاز دارد. این واژه‌ها عبارتند از: ۱- نام ذره پرتابه ۲- نام عنصر هدف ۳- عدد جرمی هدف ۴- انرژی ورودی ذره‌ی پرتابه. کد TALYS می‌تواند سطح مقطع کل تولید یک ایزوتوپ را که از کانال‌های مختلف در یک عنصر طبیعی تولید می‌شود، محاسبه کند. همچنین قادر به محاسبه‌ی سطح مقطع تولید حالت‌های برانگیخته یک ایزوتوپ

---

<sup>1</sup> Blann

<sup>2</sup> Broeders

<sup>3</sup> Weisskopf-Ewings Evaporation Model

<sup>4</sup> Hybrid Model

است [۲۰, ۱۹]. کد TALYS در حوزه واپاشی هسته مرکب یا هسته باقیمانده تعادل یافته از مدل فشباخ<sup>۱</sup> و در حوزه واپاشی هسته مرکب پیش از تعادل از مدل اکسایتون<sup>۲</sup> استفاده می کند [۲۰, ۱۹]. این کد نسبت به کد آلیس دارای توانایی بیشتر است و همچنین اجرای برنامه کد TALYS ساده تر از کد ALICE است.

## ۳-۲ بررسی سطح مقطع (احتمال واکنش) زیرکونیوم-۸۹ از طریق واکنش های مختلف

اصولاً در بررسی سطح مقطع تولید یک رادیوایزوتوپ مسائل زیر حائز اهمیت هستند:

- **تعیین انرژی بهینه ی ذره ی پرتابی:** یعنی محدوده ای از انرژی که در آن بیشترین بهره برای تولید یک رادیوایزوتوپ و کمترین میزان تولید رادیوایزوتوپ های ناخواسته وجود داشته باشد. که این محدوده انرژی با بررسی نمودار سطح مقطع بر حسب انرژی<sup>۳</sup> به دست می آید.
- **تعیین وجود ناخالصی:** در کنار هر واکنش شیمیایی و یا هسته ای، واکنش های مزاحمی وجود دارد. پیدا کردن شرایطی که این واکنش های مزاحم را به حداقل خود برساند بسیار حائز اهمیت است.
- **تعیین بهره ی تولید:** می توان بهره ی تولید را به عنوان یک شاخص مستقل از جریان و زمان بمباران برای تولید هر رادیوایزوتوپ محاسبه نمود.

برای بررسی سطح مقطع واکنش ها یا تعیین احتمال واکنش معمولاً دو روش وجود دارد:

- ۱- **روش محاسباتی:** به علت پیچیده بودن مدل های هسته ای، کد های کامپیوتری ویژه ای جهت محاسبه ی سطح مقطع واکنش ها نوشته شده است. نمونه ای از این کد ها، کد ALICE-91 و TALYS-1.0 است.

<sup>۱</sup> Hauser-Feshbach model

<sup>۲</sup> Exciton model

<sup>۳</sup> Excitation function

۲- **روش تجربی یا آزمایشی:** یک سلسله آزمایشها توسط افراد گوناگون از نقاط مختلف جهان انجام شده و اغلب نتایج این آزمایشها با یکدیگر و نتایج حاصل از کد های کامپیوتری (روش محاسباتی) مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از اندازه گیری سطح مقطع به طور تجربی برای واکنش های هسته ای مختلف در سایت EXFOR در دسترس است [۲۱].

واکنشهای متعددی برای تولید زیرکونیوم-۸۹ وجود دارد که از آن میان با توجه به شرایط باید بهترین واکنش را انتخاب نمود. با تحقیق در مورد کارهای انجام شده توسط محققان، مشخص شده است که واکنش های ذکر شده در جدول ۱-۲ می توانند منجر به تولید زیرکونیوم-۸۹ گردند [۲۱].

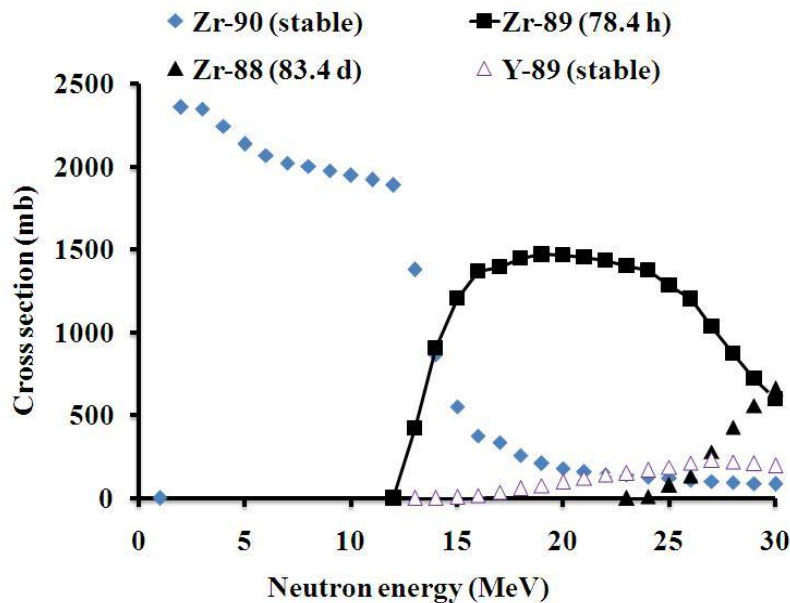
جدول ۱-۲ روش های مختلف تولید زیرکونیوم -۸۹

$^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$	$E_{\text{thr}}=4 \text{ MeV}$
$^{89}\text{Y}(d, 2n)^{89}\text{Zr}$	$E_{\text{thr}}=6 \text{ MeV}$
$^{\text{nat}}\text{Zr}(p, pxn)^{89}\text{Zr}$	$E_{\text{thr}}=18 \text{ MeV}$
$^{\text{nat}}\text{Sr}(\alpha, xn)^{89}\text{Zr}$	$E_{\text{thr}}=6 \text{ MeV}$
$^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$	$E_{\text{thr}}=12 \text{ MeV}$

در مورد واکنش های هسته ای، برای رسیدن به شرایط مطلوب، تنها پارامتر های قابل تغییر انرژی پرتابه و استفاده از مواد غنی شده در هدف است. با بررسی تابع برانگیختگی می توان محدوده‌ای از انرژی را به گونه‌ای تعیین نمود که در آن مقدار واکنش های مزاحم در کمترین حد و واکنش مطلوب در بیشترین بهره باشد. بنابراین ابتدا تابع برانگیختگی واکنش های منجر به تولید زیرکونیوم-۸۹ را که در جدول ۱-۲ ذکر شده است با استفاده از کد های محاسباتی ALICE و TALYS بررسی می کنیم و سپس با داده های تجربی مقایسه کرده و بهترین واکنش را انتخاب می کنیم.

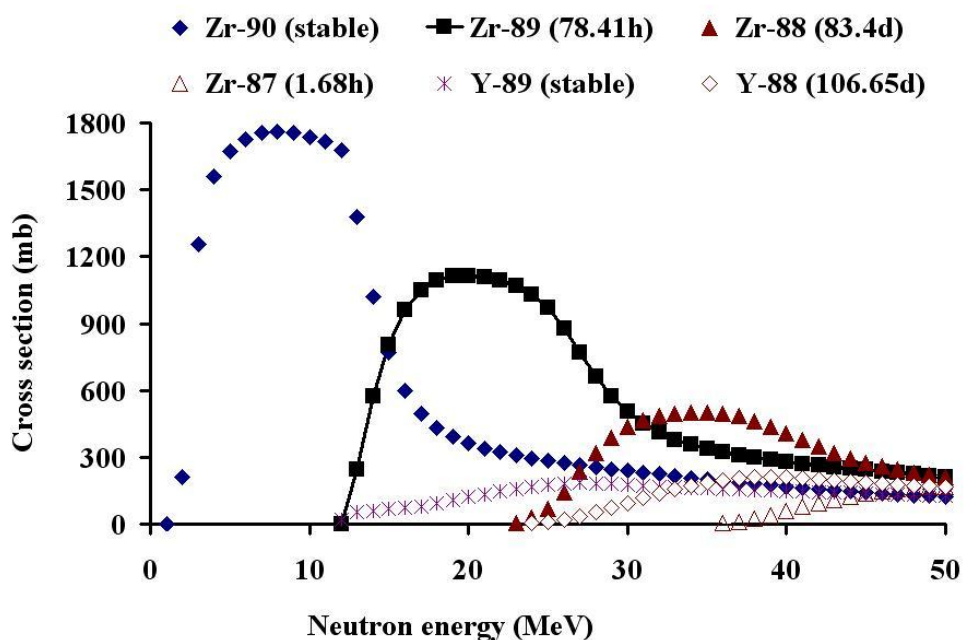
## ۲-۳-۱ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$

محاسبات ALICE و TALYS نشان می دهد که در اثر برخورد نوترونی به زیرکونیوم-۹۰ بهترین بازه ی انرژی برای تولید زیرکونیوم-۸۹ بین ۱۴ تا ۲۹ مگا الکترون ولت می باشد. در این بازه ی انرژی ناخالصی ایزوتوپی زیرکونیوم -۹۰ و زیرکونیوم-۸۸ وجود دارد. زیرکونیوم-۹۰ و زیرکونیوم-۸۸ با روش های شیمیایی قابل جداسازی از زیرکونیوم-۸۹ نیستند. بیشترین سطح مقطعی که کد آلیس پیش بینی می کند  $1469$  میلی بارن در انرژی  $19$  مگا الکترون است. کد تالیس نیز بیشترین سطح مقطع را  $1110$  میلی بارن در انرژی  $20$  مگا الکترون پیش بینی می کند. داده های تجربی در مقایسه با داده های تئوری هم خوانی دارد. شکل های ۱-۲، ۲-۲ و ۳-۲ به ترتیب تابع برانگیختگی محاسبه شده با کد های ALICE، TALYS و مقایسه با داده های تجربی را نشان می دهد [۲۶-۲۲].

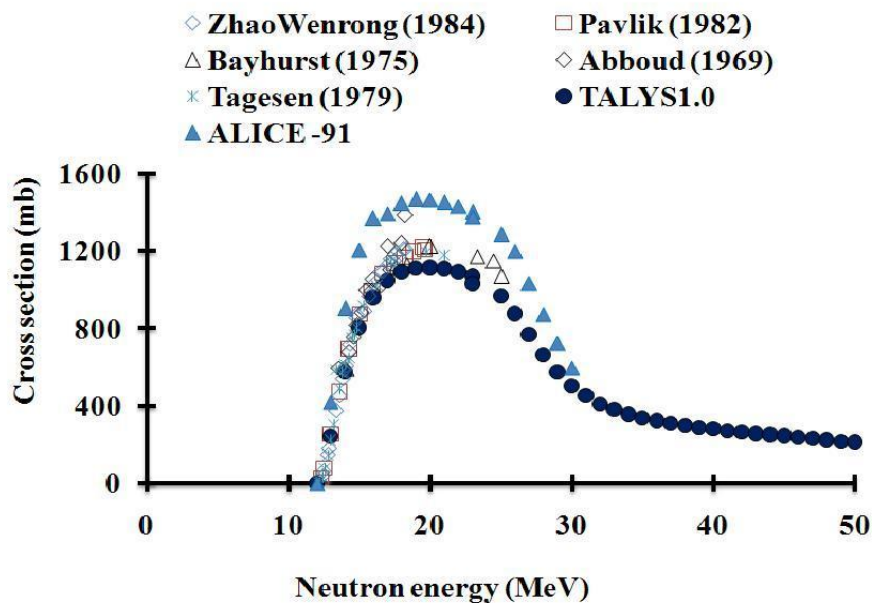


شکل ۱-۲ محاسبه ی سطح مقطع واکنش  $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$  توسط کد آلیس





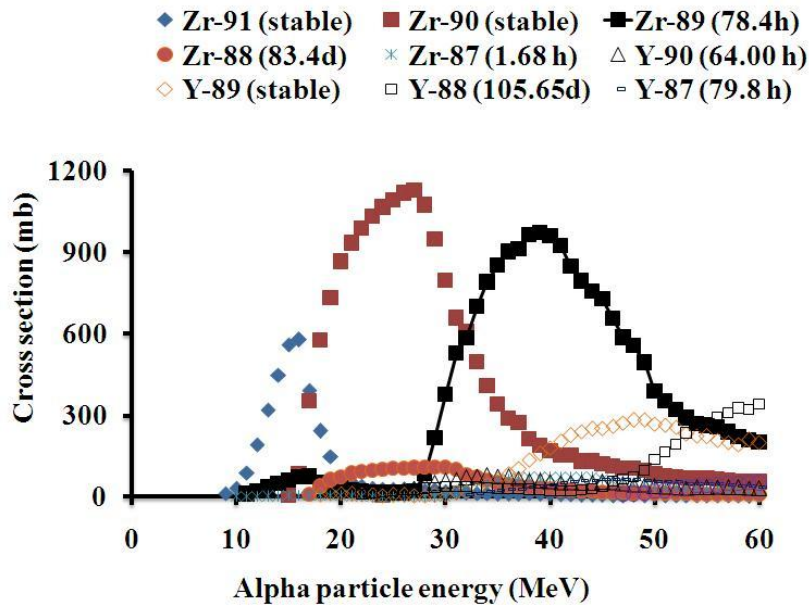
شکل ۲-۲ محاسبه‌ی سطح مقطع واکنش  $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$  با استفاده از کد تالیس



شکل ۳-۲ مقایسه‌ی سطح مقطع زیرکونیوم-۸۹ محاسبه شده توسط کد های آلیس و تالیس با سطح مقطع های تجربی

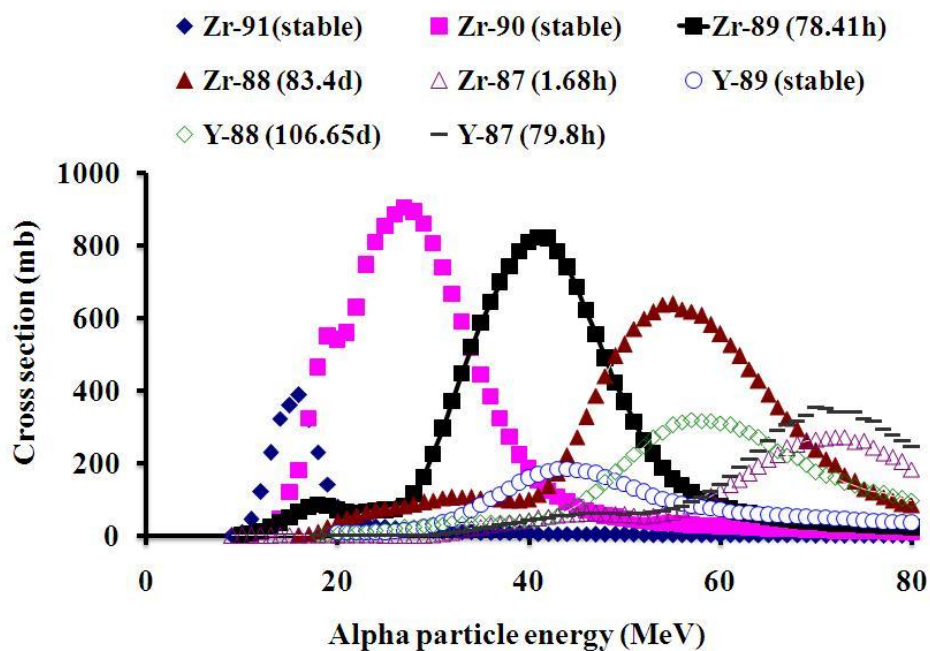
## ۲-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{89}\text{Zr}(\alpha, xn)^{\text{nta}}\text{Sr}$

نتایج حاصل از کد های محاسباتی آلیس و تالیس نشان می دهد که در اثر بمباران استرانسیوم توسط آلفا، زیرکونیوم-۸۹ در بازه ی انرژی ۱۰ تا ۶۰ مگا الکترون ولت تولید می شود. در این بازه ی انرژی زیرکونیوم-۸۸ با نیمه عمر ۸۳/۴ روز، زیرکونیوم-۹۰ و زیرکونیوم-۹۱ که پایدار هستند تولید می شوند. در این بازه ی انرژی ناخالصی ایزوتوپی زیرکونیوم-۸۸، زیرکونیوم-۹۰ و زیرکونیوم-۹۱ وجود دارد. این ناخالصی ها با روش های شیمیایی قابل جداسازی از زیرکونیوم-۸۹ نیستند. کد های آلیس و تالیس بیشترین سطح مقطعها را، که برابر ۹۶۹ میلی بارن در انرژی ۳۹ مگا الکترون و ۸۲۱ میلی بارن در انرژی ۴۱ مگا الکترون هستند، پیش بینی می کند. با توجه به شکل های ۲-۴، ۲-۵ و ۲-۶، نتایج حاصل از کد های ALICE و TALYS با نتایج تجربی بدست آمده توسط کاندیل<sup>۱</sup> و همکارانش هم خوانی دارند [۱۵].

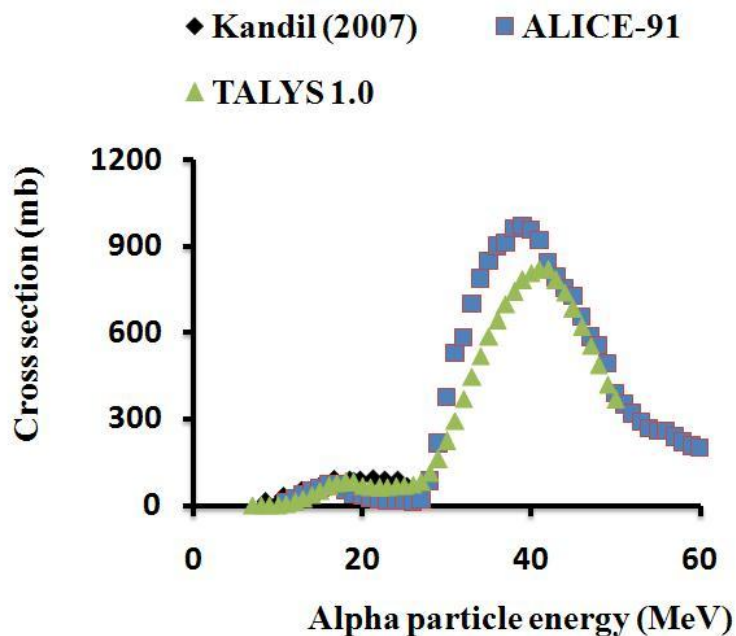


شکل ۲-۴ محاسبه ی سطح مقطع واکنش  $^{\text{nat}}\text{Sr}(\alpha, xn)^{89}\text{Zr}$  توسط کد آلیس

<sup>۱</sup> Kandil



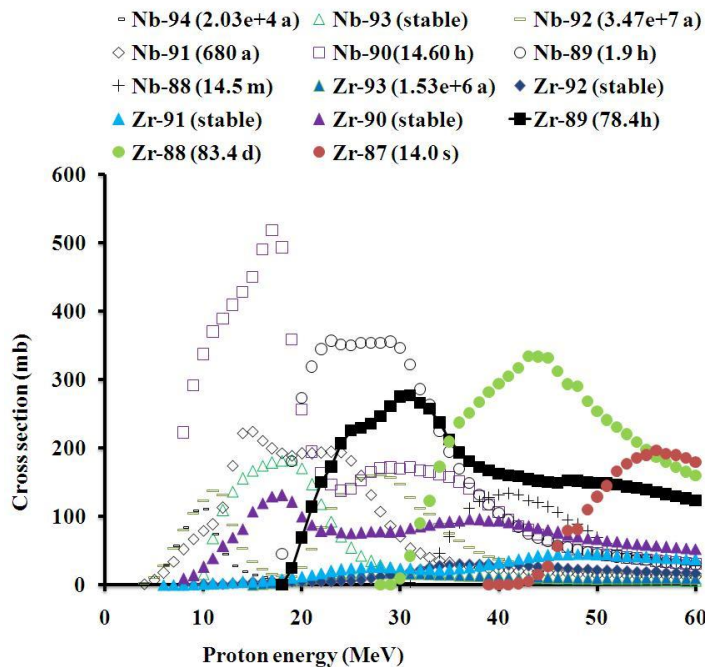
شکل ۲-۵ محاسبه‌ی سطح مقطع واکنش  $^{nat}\text{Sr}(a, xn)^{89}\text{Zr}$  توسط کد تالیس



شکل ۲-۶ مقایسه‌ی سطح مقطع زیرکونیوم-۸۹ محاسبه شده توسط کد های آلیس و تالیس با سطح مقطع های تجربی

## ۳-۳-۲ بررسی تابع برانگیختگی واکنش هسته ای $^{nat}\text{Zr}(p, p\text{xn})^{89}\text{Zr}$

طبق محاسبات این دو کد، بهترین بازه‌ی انرژی برای تولید زیرکونیوم-۸۹ در اثر بمباران زیرکونیوم طبیعی با ذرات آلفا بین ۱۵ تا ۵۰ مگا الکترون ولت است. در این بازه‌ی انرژی نیز ناخالصی‌های ایزوتوپی وجود دارند که با روشهای شیمیایی قابل جدا سازی از زیرکونیوم-۸۹ نیستند. کد آلیس بیشترین سطح مقطع را ۲۷۶ میلی بارن در انرژی ۳۱ مگا الکترون ولت و کد تالیس ۳۰۶ میلی بارن در انرژی ۲۹ مگا الکترون ولت پیش بینی می کند (شکل های ۲-۷ و ۲-۸). اودین<sup>۱</sup> و مایکل<sup>۲</sup> به صورت تجربی بر روی سطح مقطع های این واکنش تا انرژی ۶۰ مگا الکترون ولت مطالعه کرده اند [۲۷, ۲۸]. نتایج حاصل از کد های آلیس و تالیس با نتایج تجربی بدست آمده توسط اودین و مایکل و همکارانش هم خوانی نسبی دارند (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۷ محاسبه‌ی سطح مقطع واکنش  $^{nat}\text{Zr}(p, p\text{xn})^{89}\text{Zr}$  توسط کد آلیس

<sup>۱</sup> Uddin  
<sup>۲</sup> Michel