

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سقز  
دانشکده علوم

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک (هسته ای)

بررسی تولید  $^{110m}\text{In}$  با استفاده از واکنش مستقیم  $^{110}\text{Cd}(p,n)^{110m}\text{In}$

بوسیله شتابدهنده سیکلوترون

نگارنده

عبدالخالق کریمی

اساتید راهنما

دکتر طیب کاکاوند      دکتر محمد میرزایی

استاد مشاور

دکتر امیر رضا جلیلیان

تیر ۱۳۹۰



دانشگاه زنجان

### صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

شماره: ۱۵۷۹۶

تاریخ: ۹۶/۴/۲۸

با تأییدات خداوند متعال جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای: **عبدالخالق کریمی** رشته: **فیزیک** گرایش: **هسته‌ای**

تحت عنوان: بررسی تولید  $^{110m}\text{In}$  با استفاده از واکنش مستقیم  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110m}\text{In}$  بوسیله شتابدهنده سیکلوترون

در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه زنجان برگزار گردید و نظر هیأت داوران بشرح زیر می باشد:

قبول (با درجه: **عالی** امتیاز: **۸۹/۱**)  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۹۰-۹۵)  
۲- بسیار خوب (۷۵-۸۹)  
۳- خوب (۶۰-۷۴)  
۴- قابل قبول (۴۵-۵۹)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر طیب کاکاوند	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد میرزایی	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر امیررضا جلیلیان	دانشیار	
۴- استاد ممتحن خارج از دانشگاه	دکتر محمدرضا عبودزاده	استادیار	
۵- استاد ممتحن داخل دانشگاه	دکتر حسین صفری	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مرتضی واحدپور	دانشیار	

دکتر محمدحسین شهیر  
مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه

دکتر حسین صفری  
معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی  
دانشگاه زنجان

# تقدیم به

پدر بزرگوارم بخاطر صبر و آرامش

و مادر مهربان و خداکارم

که سخات زندگی در کنار وی را تا روز پسین از یاد نخواهم برد.

و تقدیم به خواهران خوبم

و برادر عزیزم

همرمان همیشگی سخته های زندگیم.

## تقدیر و تشکر

سپاس خدای را عزوجل، که قطره‌ای از دریای بی کران علم خود را بر ما چشاند و بسیاری بر نادانسته های ما افزود. انجام تحقیق حاضر منوط به یاری بزرگواران زیادی بوده است، که شایسته است از همه آنهايي که یاری دهنده من در این کار بوده‌اند سپاسگزاری کنم.

از خانواده عزیزم که تلاش من ثمره مهربانی و فداکاری آنان است، سپاسگزارم. از آقایان دکتر طیب کاکاوند استاد راهنمای اول پایان‌نامه بخاطر زحمات و راهنماییهای شان کمال تشکر را دارم و همینطور استاد راهنمای دوم، دکتر محمد میرزایی که من را مدیون الطاف خویش فرموده‌اند و نیز جناب آقای دکتر امیر رضا جلیلیان استاد مشاور اینجانب، که از پشتیبانی آنها بهره‌مند بوده‌ام سپاسگزاری خود را اعلام می‌دارم. از مسئولین محترم سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج که شرایط انجام این پایان‌نامه را فراهم آوردند. از بخش پزشکی هسته‌ای و سیکلوترون کرج بخاطر همه یاریهای بی دریغشان کمال تشکر را دارم.

از آقای دکتر سعید رجبی فر بخاطر راهنماییهای خوب و به موقع در مراحل مختلف کار تشکر و سپاسگزاری می‌کنم و همینطور از آقای دکتر محمد رضا عبود زاده رئیس بخش پزشکی هسته‌ای و سیکلوترون پژوهشکده تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج بخاطر فراهم نمودن امکان استفاده از وسایل و دستگاه‌های مختلف بخش کمال تشکر و قدردانی را دارم. از دوستان خوبم دکتر ناصر خالق پناه و دکتر حسن یوسف نیا و مهندس حسین صادقی و مهندسین مجید نوری، علی محمودی، اکبر فتحی و مهدی محمدی، وحید رنجبر، مجتبی نقوی و بهزاد محمدپور که از نظرات دل‌گرم کننده آنها همواره بهره‌مند بوده‌ام سپاسگزاری می‌کنم. از تراشکاران خوب کارگاه تراشکاری پژوهشکده که در مراحل ساخت مرا یاری دادند، آقایان عینعلی، آقایی و یوسفی کمال تشکر را دارم. همینطور برای شادروان محمد طاهریان، تراشکار مجرب و با تجربه سازمان انرژی اتمی ایران که ایده هایش راهگشای کارهای من بودند از خداوند طلب عفو و مغفرت می‌کنم (خداوند بلند مرتبه روحش را به بهشت برین شاد کند). و از همه کارمندان بخش سیکلوترون، آقایان: مهندس غلامرضا اصلانی، مهندس انصاف، مهندس محسن کمالی دهقان، مهندس بهرامی، مهندس یوسفی، مهندس شادان پور، مهندس فضایی و همچنین آقایان: رحیمی نژاد، رجامند، جعفری، بهادری، هنرمند، قهرمانی، برزو محتشمی پور و احمد کیانی، مهندس یارمحمدی و همینطور آقای مولودی و خانمها، فاتح، پیروزفر، خانم مهندس بلوری و خانم مهندس پورعبداللهی و خانمها: تقویان، خالقی، ولیزاده، موسی الرضایی و طالبی تشکر و قدردانی می‌کنم و از همه آنهايي که در این کار مرا یاری داده اند ولی اسم آنان ذکر نشده است کمال تشکر و قدردانی را دارم.

عبدالخالق کریمی

زنجان - تیر ماه ۱۳۹۰

## چکیده:

یکی از رادیوایزوتوپ‌های مهم ایندیم،  $^{110m}\text{In}$  با نیمه عمر ۶۹/۱ دقیقه می‌باشد، که با داشتن ۶۲٪ واپاشی پوزیترون در پزشکی هسته‌ای برای تصویربرداری به روش PET از آن استفاده می‌شود. با افزایش استفاده از توموگرافی گسیل پروتون در پزشکی هسته‌ای، ترکیبات نشاندار شده با  $^{110m}\text{In}$  می‌تواند بصورت بالقوه ای برای تصویربرداری به روش PET مفید باشد. از ایندیم- $^{110m}\text{In}$  می‌توان در تشخیص تومورهای ریز ( $<1\text{cm}$ ) و تومورهای غدد درون ریز از جمله لوزالمعده و معده و روده استفاده کرد. در این پروژه توابع برانگیختگی ایندیم- $^{110m}\text{In}$  توسط کد محاسباتی TALYS 1.0 برای واکنش‌های هسته‌ای  $^{110}\text{In}({}^3\text{He}, 2n){}^{109}\text{Ag}$ ،  $^{110}\text{In}({}^{110}\text{m}\text{Cd}, d, 2n){}^{110}\text{In}$ ،  $^{110}\text{In}({}^{110}\text{m}\text{Cd}, p, n){}^{110}\text{In}$  و  $^{110}\text{In}({}^{110}\text{m}\text{Cd}, p, n){}^{\text{nat}}\text{Cd}$  بررسی شد. در نهایت واکنش  $^{110}\text{In}({}^{110}\text{m}\text{Cd}, p, n)$  بعنوان واکنش مناسب جهت تولید ایندیم- $^{110m}$  انتخاب شد. گستره انرژی پرتابه به گونه ای که بازده تولید حداکثر و میزان ناخالصیهای رادیواکتیو حداقل شود بصورت ۱۳-۵ مگا الکترون ولت تعیین شد. ضخامت مورد نیاز از کادمیوم برای لایه نشانی توسط کد SRIM محاسبه شد. بدلیل شرایط عملی موجود در سیکلوترون کرج، واکنش  $^{110}\text{In}({}^{\text{nat}}\text{Cd}, p, n)$  با انرژی ۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت برای تولید رادیوایزوتوپ ایندیم- $^{110m}$  مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله ساخت هدف که یکی از مهمترین مراحل تولید هر رادیوایزوتوپ به شمار می‌رود، از روش آبکاری کادمیوم بر روی زیر لایه مسی استفاده شد.

آبکاری کادمیوم در دماها، جریان‌ها، pH ها و زمان‌های مختلف مورد آزمون قرار گرفته شد، سپس با تعیین شرایط بهینه آبکاری، هدف‌های مورد نیاز برای بمباران پروتونی توسط شتابدهنده آماده شدند. از پوشش‌های کادمیوم روی مس توسط میکروسکوپ الکترونی عکس برداری شد و دانه بندی و یکنواختی سطح لایه‌های آبکاری شده بررسی شد. سپس نمونه‌های انتخاب شده تحت آزمایش شوک حرارتی قرار گرفتند و انتخاب بهترین نمونه صورت گرفت.

هدف کادمیوم آبکاری شده به ضخامت ۴۸ میکرومتر تحت بمباران پروتونی با انرژی ۱۵-۵ مگا الکترون ولت قرار گرفت. توسط ستون کروماتوگرافی تبادل یونی جداسازی ایندیم از عناصر کادمیوم، مس و روی صورت گرفت. با استفاده از آشکارساز HPGe اکتیویته و بهره تولید محصول ایندیم- $^{110m}$  مشخص شد و بصورت قابل قبولی در توافق با محاسبات تئوری بدست آمد.

**کلمات کلیدی:** رادیوایزوتوپ، ایندیم- $^{110m}$ ، سیکلوترون، تابع برانگیختگی، سطح مقطع

## فهرست مطالب

### فصل اول: رادیوایزوتوپ ها و کاربردهای آنها

۱-۱) مقدمه	۲
۲-۱) رادیوایزوتوپ (تعریف و تاریخچه)	۲
۳-۱) رادیواکتیویته طبیعی و مصنوعی	۳
۴-۱) کاربرد رادیوایزوتوپها در صنعت و پزشکی	۴
۵-۱) ایندیم و ایزوتوپهای آن	۵
۱-۵-۱) رادیوایزوتوپ $^{111}\text{In}$	۷
۲-۵-۱) رادیوایزوتوپ $^{110\text{m}}\text{In}$	۸

### فصل دوم: شتابدهنده های مدور (سیکلوترون)

۱-۲) مقدمه	۱۲
۲-۲) سیکلوترون	۱۳
۳-۲) کاربردهای پزشکی سیکلوترون و تولید رادیوایزوتوپ ها	۱۳
۴-۲) سیکلوترون کرج	۱۵
۱-۴-۲) اجزای سیکلوترون کرج	۱۶
۲-۴-۲) چشمه یونی	۱۷
۳-۴-۲) میدانهای الکتریکی و مغناطیسی	۱۷
۴-۴-۲) سیستم شتابدهی با فرکانس بالا (RF)	۱۸
۵-۴-۲) میدان مغناطیسی سیکلوترون	۱۸
۶-۴-۲) سیستم برکننده و هدایت پرتوها به خطوط انتقال	۱۹
۷-۴-۲) سیستم خطوط انتقال پرتو	۱۹
۸-۴-۲) سیستمهای تامین خلا، خنک کننده و تامین فشار هوا	۲۰
۹-۴-۲) سیستم کنترل سیکلوترون	۲۱

## فصل سوم: پارامترهای تولید رادیو ایزوتوپ $^{110m}\text{In}$

- ۲۳ ..... (۱-۳) مقدمه
- ۲۳ ..... (۲-۳) واکنش های هسته ای
- ۲۵ ..... (۱-۲-۳) واکنش های هسته مرکب
- ۲۶ ..... (۲-۲-۳) واکنش های هسته مرکب پیش از تعادل
- ۲۸ ..... (۳-۲-۳) سطح مقطع واکنشهای هسته ای
- ۲۸ ..... (۳-۳) کد تالیس
- ۲۹ ..... (۱-۳-۳) نحوه داده دهی کد تالیس و عملیات واکنش ها
- ۳۰ ..... (۴-۳) فرآیند تولید یک رادیو ایزوتوپ
- ۳۱ ..... (۵-۳) واکنش های هسته ای تولید  $^{110m}\text{In}$
- ۳۲ ..... (۱-۵-۳) بررسی واکنش  $^{109}\text{Ag}(^3\text{He},2n)^{110}\text{In}$
- ۳۴ ..... (۲-۵-۳) بررسی واکنش:  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110m}\text{In}$
- ۳۷ ..... (۳-۵-۳) بررسی واکنش:  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110}\text{In}$
- ۳۸ ..... (۴-۵-۳) بررسی واکنش  $^{\text{nat}}\text{Cd}(p, n)^{110}\text{In}$
- ۴۰ ..... (۵-۵-۳) مقایسه نتایج کد تالیس و داده های تجربی
- ۴۱ ..... (۶-۳) محاسبه ضخامت هدف
- ۴۲ ..... (۱-۶-۳) توان ایستاندگی
- ۴۲ ..... (۲-۶-۳) کد SRIM
- ۴۴ ..... (۳-۶-۳) اجرای کد SRIM و خروجی های آن
- ۴۹ ..... (۴-۶-۳) تعیین ضخامت هدف
- ۵۰ ..... (۷-۳) محاسبه بهره تولید
- ۵۷ ..... (۸-۳) تعیین واکنش اصلی برای تولید  $^{110m}\text{In}$

فصل چهارم: طراحی هدف



۵۹	..... مقدمه (۱-۴)
۶۰	..... پوشش دهی ماده هدف و انواع آن (۲-۴)
۶۰	..... لایه نشانی فلز به روش تبادل بار یا فرایند غوطه وری (۱-۲-۴)
۶۱	..... لایه نشانی فلز به روش اتصال (۲-۲-۴)
۶۱	..... پاشش حرارتی (۳-۲-۴)
۶۲	..... اصول آبکاری الکتریکی و انواع آن (۳-۴)
۶۳	..... آبکاری به روش الکترولیز (۱-۳-۴)
۶۳	..... الکترولیت و هدایت الکتریکی محلول (۲-۳-۴)
۶۴	..... الکترودها و موقعیت آنها (۳-۳-۴)
۶۴	..... آنها (۴-۳-۴)
۶۵	..... تشکیل رسوب فلز (۵-۳-۴)
۶۵	..... ویژگی های آبکاری الکتریکی (۶-۳-۴)
۶۶	..... قوانین الکتروشیمیایی (۷-۳-۴)
۶۷	..... چگالی جریان (۸-۳-۴)
۶۷	..... راندمان آند (۹-۳-۴)
۶۸	..... اهمیت pH در آبکاری الکتریکی (۱۰-۳-۴)
۶۸	..... درجه حرارت (۱۱-۳-۴)
۶۸	..... غلظت فلز (۱۲-۳-۴)
۶۹	..... آبکاری هدف کادمیوم با استفاده از الکترولیت های ساخته شده (۴-۴)
۶۹	..... خصوصیات کادمیوم (۱-۴-۴)
۶۹	..... واکنش کادمیوم با اسیدها و بازها (۲-۴-۴)
۷۱	..... سلول آبکاری (cell) (۵-۴)
۷۲	..... آزمایش های آبکاری (۶-۴)
۷۲	..... آماده سازی زیر لایه مسی (۱-۶-۴)

۷۳	..... بررسی اثر جریان (۲-۶-۴)
۷۴	..... بررسی اثر pH (۳-۶-۴)
۷۴	..... بررسی اثر دما (۴-۶-۴)
۷۵	..... بررسی مولاریته سولفات کادمیوم و سیانید پتاسیم (۵-۶-۴)
۷۵	..... کنترل کیفی هدف (۷-۴)
۷۵	..... یکنواختی سطح (۱-۷-۴)
۷۵	..... آزمایش شوک حرارتی (۲-۷-۴)
۷۶	..... میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (۳-۷-۴)
۷۷	..... نتایج حاصل از بررسی با میکروسکوپ الکترونی بر روی لایه های آبکاری شده (۴-۷-۴)

#### فصل پنجم: تولید $^{110m}\text{In}$

۸۲	..... مقدمه (۱-۵)
۸۲	..... بمباران هدف (۲-۵)
۸۴	..... کنترل رادیونوکلئیدی قبل از شیمی استخراج (۳-۵)
۸۵	..... روشهای جداسازی شیمیایی عناصر مختلف در یک محلول (۴-۵)
۸۶	..... الکترولیز (۱-۴-۵)
۸۶	..... رسوب و همرسوبی (۲-۴-۵)
۸۷	..... ستون مبادله کننده یونی (کروماتوگرافی تبادل یونی) (۳-۴-۵)
۹۰	..... استخراج مایع-مایع (استخراج حلال) (۴-۴-۵)
۹۱	..... روش غشاء مایع (۵-۴-۵)
۹۲	..... روشهای جداسازی شیمیایی فلزات ایندیم، کادمیوم، مس و روی (۵-۵)
۹۲	..... انتخاب روش جداسازی در این پروژه (۱-۵-۵)
۹۲	..... جداسازی ایندیوم از محصولات تولید شده (۲-۵-۵)
۹۳	..... اندازه گیری فعالیت و بهره تولید (۶-۵)

۷-۵) پلاروگرافی ..... ۹۶

۷-۵-۱) آنالیز محلول‌های حاصل از جداسازی توسط دستگاه پلاروگرافی ..... ۹۷

### فصل ششم: نتایج

۶-۱) بحث و نتیجه‌گیری ..... ۹۹

۶-۲) نتایج و پیشنهادات ..... ۱۰۰

مراجع ..... ۱۰۲

پیوست الف ..... ۱۰۵

## فهرست جداول

- جدول ۱، ۱ خواص شیمیایی واتمی ایندیم ..... ۶
- جدول ۱، ۲ خواص فیزیکی ایندیم ..... ۶
- جدول ۱، ۳ ایزوتوپهای ایندیم و ویژگیهای ..... ۷
- جدول ۱، ۲ بعضی از ایزوتوپهای مفید و انرژی های آنها ..... ۱۴
- جدول ۱، ۳ واکنشهای تولید ایندیم- $^{110m}$  ..... ۳۱
- جدول ۲، ۳ ضخامت هدف برای تولید  $^{110m}\text{In}$  با استفاده از کد SRIM در واکنش های مختلف ..... ۵۰
- جدول ۳، ۳ محاسبه ضخامت و بهره تولید در بازه های بهینه انرژی برای واکنشهای تولید  $^{110m}\text{In}$  ..... ۵۶
- جدول ۱، ۴ خواص فیزیکی کادمیوم ..... ۶۹
- جدول ۲، ۴ پتانسیل های احیاء کادمیوم ..... ۷۰
- جدول ۳، ۴ بررسی اثر جریان بر لایه نشانی کادمیوم ..... ۷۳
- جدول ۴، ۴ بررسی اثر pH بر لایه نشانی کادمیوم ..... ۷۴
- جدول ۵، ۴ بررسی اثر دما بر لایه نشانی کادمیوم ..... ۷۴
- جدول ۶، ۴ بررسی اثر مولاریته سولفات کادمیوم و سیانید پتاسیم بر لایه نشانی کادمیوم ..... ۷۵
- جدول ۷، ۴ نتایج شوک حرارتی هدفهای آبکاری کادمیوم بر روی مس ..... ۷۶
- جدول ۱، ۵ پارامترهای بمباران هدف کادمیوم طبیعی ..... ۸۳
- جدول ۲، ۵ پیش بینی ها ..... ۸۵
- جدول ۳، ۵ خصوصیات گاماهاى موجود در طیف نمونه ..... ۹۵
- جدول ۶، ۵ مقادیر ناخالصی ها مطابق نتایج حاصل از پلاروگرافی ..... ۹۷

## فهرست نمودارها

- نمودار ۳، ۱ سطح مقطع های محصولات واکنش  $^{109}\text{Ag}(^3\text{He},2n)^{110}\text{In}$  بر حسب انرژی ..... ۳۳
- نمودار ۳، ۲ تفکیک سطح مقطعی حالت پایه و ایزومری در تولید  $^{110\text{m}}\text{In}$  در واکنش  $^{109}\text{Ag}(^3\text{He},2n)^{110}\text{I}$  ..... ۳۴
- نمودار ۳، ۳ سطح مقطع های واکنش  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110\text{m}}\text{In}$  بر حسب انرژی ذره فرودی ..... ۳۵
- نمودار ۳، ۴ تفکیک حالت های ایزومری و پایه از همدیگر در تولید  $^{110}\text{In}$  بوسیله واکنش  $^{110}\text{Cd}(d,2n)^{110}\text{In}$  ..... ۳۶
- نمودار ۳، ۵ سطح مقطع های واکنش  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110}\text{In}$  بر حسب انرژی ذره فرودی ..... ۳۷
- نمودار ۳، ۶ تفکیک حالت های ایزومری و پایه از همدیگر در تولید  $^{110}\text{In}$  بوسیله واکنش  $^{110}\text{Cd}(p, n)^{110}\text{In}$  ..... ۳۸
- نمودار ۳، ۷ سطح مقطع های واکنش  $^{\text{nat}}\text{Cd}(p, n)^{110}\text{In}$  بر حسب انرژی ذره فرودی ..... ۳۹
- نمودار ۳، ۸ مقایسه نتایج تجربی و داده های حاصل از کد تالیس ..... ۴۰
- نمودار ۳، ۹ بهره تولید  $^{110\text{m}}\text{In}$  در واکنش پروتون با  $^{110}\text{Cd}$  ..... ۴۰
- نمودار ۳، ۱۰ بهره تولید  $^{110\text{m}}\text{In}$  در واکنش پروتون با  $^{\text{nat}}\text{Cd}$  ..... ۴۰
- نمودار ۵، ۱ گاما های مختلف آشکارسازی شده از محصول بمباران کادمیوم برای تهیه  $^{110\text{m}}\text{In}$  ..... ۹۵

## فهرست شکل ها

- شکل ۱، ۱ واپاشی های  $^{110m}\text{In}$  ..... ۹
- شکل ۱، ۲ اِشتابدهنده سیکلوترون ..... ۱۵
- شکل ۱، ۳ الگوریتم عملیات بر روی داده هادر کد تالیس ..... ۲۹
- شکل ۲، ۳ توان ایستاندگی و برد  $^3\text{He}$  در هدف  $^{109}\text{Ag}$  محاسبه شده توسط کد SRIM 2006 ..... ۴۴
- شکل ۳، ۳ توان ایستاندگی و برد  $^3\text{He}$  در هدف  $^{110}\text{Cd}$  محاسبه شده توسط کد SRIM2006 ..... ۴۵
- شکل ۴، ۳ توان ایستاندگی و برد p در هدف  $^{\text{nat}}\text{In}$  محاسبه شده توسط کد SRIM2006 ..... ۴۶
- شکل ۵، ۳ توان ایستاندگی و برد d در هدف  $^{110}\text{Cd}$  محاسبه شده توسط کد SRIM2006 ..... ۴۷
- شکل ۶، ۳ توان ایستاندگی و برد p در هدف  $^{110}\text{Cd}$  محاسبه شده توسط کد SRIM2006 ..... ۴۸
- شکل ۷، ۳ توان ایستاندگی و برد p در هدف  $^{\text{nat}}\text{Cd}$  محاسبه شده توسط کد SRIM 2006 ..... ۴۹
- شکل ۱، ۴ طرحواره دستگاه پاشش سرد ..... ۶۲
- شکل ۲، ۴ محفظه آبکاری کادمیوم ..... ۷۱
- شکل ۳، ۴ میکروسکوپ الکترونی روبشی ..... ۷۷
- شکل ۴، ۴: تصاویر SEM مربوط به آبکاری در  $\text{pH}=11$  (۱،۲) ..... ۷۸
- شکل ۵، ۴: تصاویر SEM مربوط به آبکاری در  $\text{PH}=13$  ..... ۷۸
- شکل ۶، ۴: تصاویر SEM مربوط به آبکاری در  $\text{PH}=13$  (۴،۳) ..... ۷۹
- شکل ۷، ۴: تصاویر SEM مربوط به آبکاری در  $\text{PH}=13$  ( $\text{D}_4, \text{D}_3$ ) ..... ۷۹
- شکل ۱، ۵ هدف آماده شده برای بمباران، آبکاری کادمیوم روی مس ..... ۸۲
- شکل ۲، ۵ سیکلوترون کرج ..... ۸۳
- شکل ۳، ۵ سل ایندیوم در واحد هات سل کرج ..... ۸۴
- شکل ۴، ۵ رزین های داوکس ..... ۸۹

## فصل اول

# رادیوایزوتوپ ها و کاربردهای آنها

## ۱-۱) مقدمه

امروزه رادیوایزوتوپها نقشی مهم و فزاینده در زندگی بشری ایفا می‌کنند و کاربردهای وسیعی در بسیاری از رشته‌ها و زمینه‌ها دارند. رادیوایزوتوپها بطور گسترده در پزشکی، صنعت، کشاورزی و تحقیقات علمی استفاده شده و کاربردهای جدید آنها دائماً در حال گسترش و توسعه است. در بسیاری از موارد جایگزینی برای رادیوایزوتوپها وجود نداشته و در بیشتر کاربردها نسبت به تکنیک‌ها و روش‌های دیگر موثرتر و ارزانتر هستند.

## ۲-۱) رادیوایزوتوپ (تعریف و تاریخچه)

رادیوایزوتوپ از ترکیب دو کلمه مستقل رادیو و ایزوتوپ در زبان انگلیسی تشکیل شده است که رادیو از ریشه کلمه تابش (Radiation) یعنی کلمه لاتین Radiātiō به معنی درخشان و تابناک آمده است و در سال ۱۹۱۳ بوسیله مارگارت تود (Margaret todd) فیزیکدان اسکاتلندی ابداع شد. فردریک سودی (Fredrick soddy) شیمیدانی در دانشگاه گلاسکو (Glasgow) بود که طبق بررسی‌هایش توضیح داد که هر مکان در جدول تناوبی عناصر بوسیله اجزای چند تایی اشغال شده است. بنابراین تود (Todd) پیشنهادی در جهت گفته‌های سودی (soddy) ارائه نمود و نام مناسب برای این ناشناخته‌ها را کلمه یونانی ایزوتوپ به معنی (هم مکان) گذاشت.

در حقیقت همه چیز در سال ۱۸۹۵ با کشف مدیر انستیتو ورزبرگ (Wurzburg) ویلهلم رونتگن (Wilhelm roentgen) شروع شد. کشف رونتگن اشعه ایکس بود که برای این کشف موفق به دریافت جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۱ شد. هنری پوانکاره در طول جلسه هفتگی آکادمی علوم فرانسه، کشف رونتگن را به اطلاع بقیه دانشمندان پاریس رساند، در این جلسه هنری بکرل تصمیم گرفت تا ارتباط بین اشعه ایکس و پدیده فلورسانس را بررسی کند. او در این موقع بصورت کاملاً اتفاقی روی فلورسانس نمکهای اورانیوم مطالعه می‌کرد. وی پس از یک اتفاق راز اشعه ساطع شده از اورانیوم را در سال ۱۸۹۶ پیدا کرد و ماری کوری (Marie Curie) دانشجوی دکتری هنری بکرل (Antoine Henri Becquerel) این پدیده را رادیواکتیویته نامید. در سال ۱۸۹۸ رادیم بوسیله ماری و پییر کوری کشف شد. تا سال ۱۹۰۳ ماری توانست عنصر پلونیوم را نیز کشف کند و کلمه رادیواکتیویته را ابداع نمود و در سال ۱۹۰۳ به همراه پییر کوری و هنری بکرل موفق به دریافت جایزه نوبل فیزیک شوند. در سال ۱۹۰۵ آلبرت اینشتین (Albert Einstein) هم ارزی جرم و انرژی را اثبات نمود و در سال ۱۹۱۳ ارنست رادرفورد (Rutherford) موفق شد مدل هسته اتمی را توضیح



دهد. در سال ۱۹۰۳ سیکلوترون بوسیله ارنست لورنتس اختراع شد و در سال ۱۹۱۱ جورج د هوسی (George de Hevesy) نظریه استفاده از ردیابهای رادیواکتیو را مطرح نمود. در سال ۱۹۱۳ فردریک پروچر (Fredrick Procher) اولین مقاله خود در مورد تزریق رادیوم میان وریدی برای معالجه بیماریهای مختلف را انتشار نمود

در سال ۱۹۲۷ هرمان بلومگارت (Herrman Blumgart) فیزیکدان بوستونی و استاد پزشکی دانشکده پزشکی دانشگاه هاروارد برای اولین بار از ردیابهای رادیواکتیو برای تشخیص بیماریهای قلبی استفاده کرد. در سال ۱۹۳۵ ابرون و ژولیت کوری (Irene and Joliot-Curie) بخاطر کشف اولین رادیو ایزوتوپ مصنوعی موفق به دریافت جایزه نوبل شیمی شدند. در همان سال (۱۹۳۵) جورج د. هوسی شروع به استفاده از رادیوایزوتوپهای مصنوعی بعنوان ردیاب کرد و توانست در سال ۱۹۴۳ موفق به دریافت جایزه نوبل شیمی شود. جورج هوسی اولین بار برای اینکه غذایش را تست کند از رادیو ایزوتوپ استفاده کرد. او در یک پانسیون شبانه روزی زندگی می کرد و مشکوک شد به اینکه غذایی که زن صاحب پانسیون سرو کرده بود از پسماند روزهای قبل می باشد، برای آزمایش فرضیه اش مقدار کمی از یک رادیوایزوتوپ را در باقیمانده غذای خورده نشده اش قرار داد روز بعد پس از آزمایش غذایش با آشکارساز ثابت کرد که مقادیری از غذا واقعا از روز قبل می آیند [1]. سال ۱۹۵۳ سال تولد تصویربرداری با پوزیترون بود و در سال ۱۹۵۷ در برکلی کالیفرنیا هال انگر (Hal Anger) دوربین گاما را کشف نمود [2]. در سال ۱۹۵۸ ژنراتور تکنسیم  $m99$  ابداع شد. در سال ۱۹۶۲ دیوید کول (David kull) توموگرافی نوسازی گسیل که بعدها SPECT و PET نام گرفت را مطرح نمود. در سال ۱۹۷۳ تالیم  $201$  برای مصارف پزشکی (برای عکسبرداری قلب) به کار برده شد. همینطور سال ۱۹۷۴ اولین دوربین PET برای مطالعات انسانی ساخته شد [3].

### ۱-۳) رادیواکتیویته طبیعی و مصنوعی

رادیواکتیویته طبیعی اورانیم در سال ۱۸۹۶ به وسیله بکرل کشف شد، تا سال ۱۹۳۴ تنها مواد رادیواکتیو طبیعی شناخته شده بودند. واکنشهای هسته ای که بصورت خودبخودی انجام می شوند، نمونه ای از رادیواکتیویته طبیعی هستند. رادیوایزوتوپ های طبیعی دونه هستند. رادیوایزوتوپ های با نیمه عمر بالا مثل  $^{232}\text{Th}$ ،  $^{238}\text{U}$ ،  $^{87}\text{Rb}$ ،  $^{40}\text{K}$ ، که از بدو بوجود آمدن عناصر زمینی از حدود  $10^9 \times 4/5$  سال پیش باقی مانده اند و رادیوایزوتوپ های همانند  $^{14}\text{C}$  که دارای نیمه عمر نسبتاً کوتاه بوده و به طور مداوم به وسیله برهمکنش های پرتوهای کیهانی در اتمسفر پایین تشکیل می شوند. سه سری

رادیواکتیو طبیعی در میان عناصر جدول تناوبی وجود دارد. که عبارتند از سری اورانیوم، سری اکتینیوم و سری توریم. نامگذاری سری ها به این دلیل است که هر سری پس از عنصری که نامگذاری شده است شروع می شود. (غیر از سری اکتینیوم که با ایزوتوپ مختلف اورانیوم شروع می شود) هر سری بوسیله تابش آلفا و بتا به تعدادی از هسته های ناپایدار واپاشی می کند تا اینکه هر سری روی یک ایزوتوپ مختلف سرب پایان می یابد. بسیاری از رادیونوکلئیدهای طبیعی دارای نیمه عمرهای طولانی (بیش از ۱۰۰۰ سال) هستند و مورد توجه پزشکی هسته‌ای نمی باشند. همه واکنشهای هسته ای خود بخود نیستند بلکه قسمتی از آنها به عنوان مثال زمانی که ایزوتوپهای پایدار بوسیله ذراتی مثل نوترون بمباران می شوند، رخ می دهند. این روش تحریک کردن واکنش هسته ای تا اینکه اتفاق بیافتد را رادیواکتیویته مصنوعی گویند. این به معنی واکنشهای هسته ای می باشد که بصورت خودبخودی دیده نمی شوند و اکنون می توانند مشاهده شوند. بعد از کشف شکافت هسته، صدها هسته رادیواکتیو جدید از طریق بمباران نوترونی بوجود آمده است. تعداد زیادی رادیوایزوتوپ های مصنوعی بین سالهای ۱۹۳۹-۱۹۳۴ بوسیله بمباران عناصر، با ذرات قابل دسترس در دستگاههای شتابدهنده مثل سیکلوترون تولید شد. تقریباً از سال ۱۹۴۰، یک سری از عناصر جدید با اعداد اتمی بالای ۹۲ (عدد اتمی سنگین ترین عنصر طبیعی) بصورت مصنوعی ساخته شده اند. رادیونوکلئیدهای بکار رفته در پزشکی هسته‌ای عموماً مصنوعی می باشند.

#### ۱-۴) کاربرد رادیوایزوتوپها در صنعت و پزشکی

در نیم قرن گذشته ، رادیوایزوتوپها کاربرد وسیعی در پزشکی، کشاورزی، صنعت و تحقیقات پیدا کرده اند. خواص تابشهای رادیواکتیو و رفتار ویژه آنها در گستره وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گرفته است. کاربردهای چشمه ها و مواد رادیواکتیو به حدی گسترده و وسیع می باشد که حتی فهرست کردن این کاربردها بدون توضیحات تخصصی آنها نیز بسیار طولانی می باشد. در کنار بهره برداری های مختلف از مواد رادیواکتیو و محصولات فناوری هسته ای در زمینه های پزشکی و کشاورزی ، می توان به کاربردهای گسترده آن در زمینه صنعت نیز اشاره نمود. به طور خلاصه می توان به چند عنوان مهم از استفاده های رادیوایزوتوپها و تابشهای آن اشاره کرد:

- ۱- استفاده های پزشکی، که می تواند شامل تشخیص و درمان بافتهای سرطانی و ... باشد.
- ۲- پرتودهی محصولات کشاورزی، که به منظور های استرلیزه کردن، تغییرخواص مواد و افزایش دوره نگهداری آنها و ... می باشد.

۳- در سیستم های اندازه گیری، برای تعیین ضخامت، چگالی و سطح از چشمه های رادیواکتیو استفاده می کنند.

۴- در سیستم های تصویربرداری، صنعتی و آنالیز مواد و ... نیز از رادیوایزوتوپها استفاده می شود [4].

## ۱-۵) ایندیم و ایزوتوپهای آن

ایندیم عنصری فلزی است نرم ، چکش خوار ، براق و به رنگ سفید - نقره ای که به صورت ساختار تترا گونال متبلور می شود. این عنصر در سال ۱۸۶۳ توسط فردیناند ریچ (Ferdinand Reich) و هیرونیموس تئودور ریچر (Hieronymus Theodor Richter) در آلمان کشف گردید. ریچ (Reich) این عنصر را از جداسازی فلزات به دست آورد. در حد غلظتهای بسیار پایین در اغلب سنگهای معدنی یافت می شود . به طور معمول در معادن روی یافت می شود. ایندیم برای مصارف تجاری از نهشته های روی به دست می آید. همچنین این عنصر در معادن مس و آهن و سرب نیز یافت می شود. حدود ۳۰۰۰۰۰ کیلوگرم ایندیم سالیانه در دنیا تولید می شود. کانادا به تنهایی سالیانه بیش از ۷۵۰۰۰ کیلوگرم ایندیم تولید می کند.

ایندیم با خلوص بسیار بالا خیلی نرم و دارای درخشندگی زیادی می باشد. از این عنصر برای ساخت آلیاژهایی با نقطه ذوب پایین استفاده می شود. یکی از این آلیاژها، دارای ۲۴ درصد ایندیم و ۷۶ درصد گالیم می باشد که در دمای اتاق مایع می باشد. از این ترکیب برای ساخت ترانزیستورهای ژرمانیم و یکسوکننده ها و مقاومت گرمایی و رساناهای حساس نسبت به نور استفاده می شود. همچنین از این عنصر برای روکش فلزات و تبخیر روی شیشه جهت درست کردن آینه ها استفاده می شود. این عنصر نسبت به نقره مقاومتش در برابر خوردگی هوا بیشتر است. ایندیم دارای خاصیت سمی است که در موقع استفاده از آن باید دقت لازم را به عمل آورد [5].

جدول ۱، ۱ خواص شیمیایی و اتمی ایندیم

خواص اتمی		خواص شیمیایی	
۱۱۴/۸۱۸ (amu)	وزن اتمی	Indium	نام
156 (pm)	شعاع اتمی (محاسبه شده)	In	علامت اختصاری
155 (pm)	شعاع اتمی (تجربی)	فلز ضعیف	گروه شیمیایی
144 (pm)	شعاع کووالانسی (تجربی)	III A , 5 , p ۱۳	گروه , تناوب , بلوک
142 (pm)	شعاع کووالانسی (۲۰۰۸)	1.2 731(kg/m <sup>3</sup> )	جرم حجمی , سختی
193 (pm)	شعاع وندروالس	خاکستری درخشان، نقره‌ای	رنگ
(آمفوتریک)	درجه اکسیداسیون (اکسید)		
چهار گوش	ساختار کریستالی		

جدول ۲، ۱ خواص فیزیکی ایندیم

خواص متفرقه		خواص فیزیکی	
1.78 (درجه پائولینگ)	الکترونگاتیویته	جامد دردمای ۲۹۸ کلوین	حالت ماده
233 (J/kg*K)	ظرفیت گرمایی ویژه	429.75 K	نقطه ذوب
81.6 (W/mK)	رسانائی گرمایی	2345 K	نقطه جوش
558.3 (kJ/mol)	1st پتانسیل یونیزاسیون	15.76 (cm <sup>3</sup> )	حجم مولی
1820.7 (kJ/mol)	2nd پتانسیل یونیزاسیون	231.5 (kJ/mol)	گرمای تبخیر
2704 (kJ/mol)	3rd پتانسیل یونیزاسیون	3.263 (kJ/mol)	گرمای هم جوشی
5210 (kJ/mol)	4th پتانسیل یونیزاسیون	1215 (m/s)	سرعت صوت
		7310 (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی بخار

ایزوتوپهای این عنصر براساس افزایش انرژی تابش آنها در جدول زیر آمده است [6].