



دانشگاه سوادکوه

دانشکده علوم - گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه تولید رادیوایزوتوپ ^{55}Fe از طریق واکنش $^{55}\text{Mn}(p,n)^{55}\text{Fe}$

ناهید صهبی

استاد راهنما

دکتر طیب کاکاوند

دکتر مهدی صادقی

استاد مشاور

دکتر سعید رجبی فرد

مهر ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم

آنان که ناتوان شدن تا به توانایی برسم و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود و
روشنگر راهم باشند.

و

خواهر مهربانم

نگارنده بر خود می‌داند که

از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی جناب آقای دکتر طیب کاکاوند و جناب آقای دکتر مهدی صادقی در راستای انجام این پروژه در طول دو سال گذشته تشکر و قدردانی نماید.

و

از زحمات جناب آقای دکتر سعید رجبی فر و جناب آقای مهندس یار محمدی و جناب آقای دکتر امیدرضا کاکویی تشکر نماید.

و

همچنین از راهنمایی‌های سرکار خانم زهرا علی پور و دکتر لیلا مختاری قدردانی نماید.

چکیده

رادایونوکلید آهن-۵۵ ($T_{1/2} = 2.73 \text{ a}$) توسط گیراندازی الکترون (EC) واپاشی می‌کند و در زمینه‌های کشاورزی، صنعتی و پزشکی قابل استفاده می‌باشد. در این تحقیق تابع برانگیختگی آهن-۵۵ تحت واکنش‌های $^{55}\text{Mn}(d,2n)^{55}\text{Fe}$ ، $^{54}\text{Fe}(\alpha,n2p)^{55}\text{Fe}$ و $^{55}\text{Mn}(p,n)^{55}\text{Fe}$ بوسیله کدهای ALICE/ASH، TALYS-1.2 و EMPIRE-3.1 محاسبه و بررسی می‌شود. ضخامت لازم برای هدف توسط کد SRIM محاسبه و بهره تولید ^{55}Fe بوسیله انتگرال عددی SIMPSON به دست می‌آید و همچنین داده‌های به دست آمده و مقادیر تجربی با هم مقایسه می‌شوند. واکنش مناسب $^{55}\text{Mn}(p,n)^{55}\text{Fe}$ ، با تابع برانگیختگی بزرگ و ناخالصی ایزوتوپی و غیر ایزوتوپی کم جهت تولید ^{55}Fe انتخاب می‌شود. با توجه به نتایج، بازه انرژی بهینه ۱-۱۸ MeV انتخاب می‌شود و بهره تولید مقدار ۰/۳۵ MBq/ μAh به دست می‌آید. سرانجام لایه نازکی از پودر MnO_2 روی سطح مس بوسیله روش لایه نشانی، نشانده می‌شود. با تکرار چندین آزمایش و استفاده از مقادیر مختلف اتیل سلولز و استون شرایط بهینه برای لایه نشانی بدست می‌آید. ظاهر بصری، ریخت شناسی و ناخالصی‌های پودر بکار رفته در لایه هدف، به ترتیب توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیزگر XRD بررسی می‌شود. در نهایت هدف توسط پروتون‌های با انرژی ۱۸ MeV و با جریان ۲۰ μA به مدت ۳/۳ h بمباران می‌شود و رادیو اکتیویته ^{55}Fe بوسیله آشکارساز اشعه ایکس با قدرت تفکیک بالا تعیین می‌شود. در نهایت بهره تولید واکنش اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود.

کلمات کلیدی: تابع برانگیختگی، آهن-۵۵، کدهای محاسباتی هسته‌ای، تولیدات سیکلوترونی، روش لایه نشانی، طراحی هدف.

فصل اول: رادیوایزوتوپ ^{55}Fe

۲	مقدمه.....
۲	۱-۱: ایزوتوپ و رادیوایزوتوپ.....
۳	۲-۱: کشف آهن.....
۴	۳-۱: خواص شیمیایی و بیولوژیکی.....
۵	۴-۱: آهن-۵۵ و کاربرد های آن.....
۶	۵-۱: تولید رادیونوکلئید آهن-۵۵.....
۶	۶-۱: هدف از این تحقیق.....

فصل دوم: تئوری تولید رادیونوکلئید

۹	مقدمه.....
۹	۱-۲: واکنش های هسته ای.....
۱۰	۲-۲: تعریف مقدار Q واکنش هسته ای.....
۱۱	۳-۲: انرژی آستانه واکنش.....
۱۲	۴-۲: سطح مقطع واکنش.....

۱۴	۵-۲: برهم کنش ذرات باردار با ماده.....
۱۴	۶-۲: توان ایستاندگی و برد.....
۱۶	۷-۲: هدف نازک و هدف ضخیم.....
۱۶	۸-۲: معادلات اکتیویته و بهره تولید رادیوایزوتوپ.....
۲۰	۹-۲: سازوکار واکنش‌های هسته‌ای.....
۲۱	۱-۹-۲: واکنش‌های هسته مرکب.....
۲۱	۲-۹-۲: واکنش‌های پیش تعادلی.....
۲۲	۳-۹-۲: واکنش‌های مستقیم.....
۲۳	۱۰-۲: روش‌های تولید رادیونوکلئید.....
۲۳	۱-۱۰-۲: تولید مستقیم رادیونوکلئید.....
۲۷	۲-۱۰-۲: تولید غیرمستقیم (ژنراتور) رادیونوکلئید.....

فصل سوم: محاسبه داده‌های هسته‌ای

۲۹	مقدمه.....
۲۹	۱-۳: برنامه‌های کامپیوتری.....
۳۰	۱-۱-۳: کد ALICE/ASH.....
۳۰	۲-۱-۳: کد TALYS-1.2.....
۳۲	۳-۱-۳: کد EMPIRE- 3.1.....
۳۲	۲-۳: بررسی واکنش‌های تولید ^{55}Fe
۳۳	۱-۲-۳: سطح مقطع تولید ^{55}Fe از طریق واکنش $^{54}\text{Fe}(\alpha, n2p)^{55}\text{Fe}$

۳۵	.....	۲-۲-۳: سطح مقطع تولید ^{55}Fe از طریق واکنش $^{55}\text{Mn}(d,2n)^{55}\text{Fe}$
۳۸	.....	۳-۲-۳: سطح مقطع تولید ^{55}Fe از طریق واکنش $^{55}\text{Mn}(p,n)^{55}\text{Fe}$
۴۰	.....	۳-۳: بررسی توان ایستاندگی و بُرد
۴۱	.....	۱-۳-۳: معرفی کد SRIM
۴۲	.....	۲-۳-۳: نتایج کد SRIM
۴۳	.....	۴-۳: محاسبه بهره تولید
۴۳	.....	۵-۳: تعیین واکنش بهینه

فصل چهارم: طراحی هدف

۴۶	.....	مقدمه
۴۶	.....	۱-۴: طراحی هدف
۴۷	.....	۱-۱-۴: آبکاری الکتریکی ماده هدف
۴۷	.....	۲-۱-۴: ماده هدف پودری بصورت قرص
۴۸	.....	۳-۱-۴: روش رسوب نشانی
۴۹	.....	۲-۴: ضخامت هدف
۵۰	.....	۳-۴: سیستم لایه نشانی
۵۲	.....	۴-۴: تهیه هدف
۵۲	.....	۱-۴-۴: آماده سازی زیرلایه مسی
۵۳	.....	۲-۴-۴: تهیه سوسپانسیون

۵-۴: کنترل کیفی هدف ۵۶

۶-۴: نمونه‌های نهایی ۵۹

فصل پنجم: بمباران هدف

مقدمه ۶۱

۱-۵: بمباران هدف ۶۱

۲-۵: جدا سازی محصول از ناخالصی ها ۷۰

۱-۲-۵: جدا سازی با استفاده از رزین ۷۰

۲-۲-۵: جدا سازی باروش استخراج حلال- حلال ۷۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری ۷۳

پیوست (الف) ۷۶

پیوست (ب) ۸۰

منابع ۸۲

Abstract ۸۵

فهرست جداول

صفحه

عنوان

۴	جدول (۱-۱): ویژگی های آهن.....
۴۳	جدول (۳-۴): بهره تولید روش های مختلف تولید ^{55}Fe
۵۴	جدول (۱-۴): مقادیر مختلف نیترات سلولز با ۸ mL استون برای ۶۰۰ mg دی اکسید منگنز.....
۵۵	جدول (۲-۴): مقادیر مختلف متیل سلولز برای ۶۰۰ mg دی اکسید منگنز.....
۵۶	جدول (۳-۴): مقادیر مختلف اتیل سلولز برای ۶۰۰ mg دی اکسید منگنز.....
۵۸	جدول (۴-۴): تست شک حرارتی برای نمونه های نوع سوم.....
۶۲	جدول (۱-۵): پارامترهای بمباران هدف دی اکسید منگنز.....
۶۶	جدول (۲-۵): خصوصیات گاما و ایکس موجود در طیف نمونه.....
۷۰	جدول (۳-۵): اطلاعات مربوط به آشکار سازی محصول.....

فهرست نمودارها و اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): نقش سازوکارهای مستقیم، پیش تعادلی و مرکب در واکنش‌های هسته‌ای [۱۰].	۲۲
شکل (۲-۲): نمایی از طیف ذرات خروجی به تفکیک سازوکارهای مختلف [۱۰].	۲۳
شکل (۳-۲ الف) و (۳-۲ ب): شمایی از شکل دی‌ها و محل قرارگیری آهن ربای الکتریکی در سیکلوترون [۸].	۲۷
شکل (۱-۳): مدل‌های هسته‌ای در کد TALYS.	۳۱
شکل (۳-۲ الف): سطح مقطع تولید ^{55}Fe و ناخالصی‌ها از واکنش ذره آلفا با ^{54}Fe توسط کد ALICE/ASH [۹].	۳۴
شکل (۳-۲ ب): سطح مقطع تولید ^{55}Fe و ناخالصی‌ها از واکنش ذره آلفا با ^{54}Fe توسط کد TALYS-1.2 [۱۰].	۳۵
شکل (۳-۲ ج): سطح مقطع تولید ^{55}Fe از واکنش ذره آلفا با ^{54}Fe توسط کد TALYS-1.2، ALICE/ASH و EMPIRE-3.1 و مقادیر تجربی [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲].	۳۵
شکل (۳-۳ الف): سطح مقطع تولید ^{55}Fe و ناخالصی‌ها از واکنش دوترون با ^{55}Mn توسط کد ALICE/ASH [۹].	۳۶
شکل (۳-۳ ب): سطح مقطع تولید ^{55}Fe و ناخالصی‌ها از واکنش دوترون با ^{55}Mn توسط کد TALYS-1.2 [۱۰].	۳۷
شکل (۳-۳ ج): سطح مقطع تولید ^{55}Fe از واکنش دوترون با ^{55}Mn توسط کد TALYS-1.2، ALICE/ASH و EMPIRE-3.1 [۹ و ۱۰ و ۱۱].	۳۷
شکل (۳-۴ الف): سطح مقطع تولید ^{55}Fe و ناخالصی‌ها از واکنش پروتون با ^{55}Mn توسط کد ALICE/ASH [۹].	۳۹
شکل (۳-۴ ب): سطح مقطع تولید ^{55}Fe و ناخالصی‌ها از واکنش پروتون با ^{55}Mn توسط کد TALYS-1.2 [۱۰].	۳۹

- شکل (۳-۴): سطح مقطع تولید ^{55}Fe از واکنش پروتون با ^{55}Mn توسط کد TALYS-1.0، EMPIRE-3.1 و ALICE/ASH و مقادیر تجربی [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲]..... ۴۰
- شکل (۴-۱): مقایسه ضخامت هدف تحت تابش زاویه عمود و حاده ۴۹
- شکل (۴-۲): سیستم مورد استفاده در روش رسوب‌نشانی ۵۱
- شکل (۴-۳): زیرلایه مسی به همراه سیستم نگهدارنده هدف ۵۱
- شکل (۴-۴): عکس SEM رسوب دی‌اکسید منگنز روی بکینگ مسی الف (۱۵٪ اتیل سلولز ب) (۲۰٪ اتیل سلولز ج) ۲۵٪ اتیل سلولز د) (۳۰٪ اتیل سلولز ۵۷
- شکل (۴-۵): نمونه هدف تولید شده با دی‌اکسید منگنز ۵۹
- شکل (۵-۱): شتابدهنده سیکلوترون ۶۲
- شکل (۵-۲): سیستم انحلال هدف که شامل گردش جریان مایع است ۶۳
- شکل (۵-۳): طیف گامای حاصل از نمونه مورد آزمایش و پیک‌های شاخص (۲۸ روز بعد از بمباران و $t=86400\text{s}$) ۶۶
- شکل (۵-۴): طیف گامای حاصل از نمونه مورد آزمایش و پیک‌های شاخص (۴۸ روز بعد از بمباران و $t=3600\text{s}$) ۶۷
- شکل (۵-۵): شمایی از نمونه آماده شده برای آشکار ساز اشعه ایکس ۶۹
- شکل (۵-۶): طیف پرتوی ایکس حاصل از نمونه مورد آزمایش و پیک‌های شاخص (۸۴ روز بعد از بمباران و $t=3689/725$) ۶۹

فصل اول:

رادیوایزوتوپ ^{55}Fe

کاربرد تکنیک‌های هسته‌ای در مدیریت صنعتی و محیط زیست دائما در حال افزایش است. جریان پیوسته عملیات آنالیز تحلیلی و پاسخ سریع ناشی از کاربرد تکنیک‌ها و کنترل‌های هسته‌ای که رادیو ایزوتوپ‌های بسیاری در آن دخیل هستند، بدین معنی است که سرعت جریان انجام کار افزایش یافته و داده‌های تحلیلی قابل اعتماد، می‌تواند در دسترس باشد. این نوع روند کنترل سرعت کار، کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت محصول را به دنبال خواهد داشت. صنایع مدرن هم از رادیوایزوتوپ‌ها در جهات مختلفی استفاده می‌کنند که به بهبود تولید می‌انجامد و گاهی اطلاعاتی ناشی از این کاربرد به دست می‌آید که از هیچ روش دیگری نمی‌توانست قابل حصول باشد. همچنین تکنولوژی و علم تولید رادیونوکلئید در سیکلوترون‌ها یکی از ویژگی‌های بسیار مهم پزشکی هسته‌ای مدرن می‌باشد.

۱-۱: ایزوتوپ و رادیوایزوتوپ

بسیاری از عناصر در چند شکل متفاوت هسته‌ای به طور طبیعی وجود دارند که به آنها ایزوتوپ می‌گویند. ایزوتوپ‌های یک عنصر دارای پروتون‌های برابر هستند (برابر با عدد اتمی). اما تفاوتشان در تعداد نوترون‌ها است. تمام ایزوتوپ‌های یک عنصر خواص شیمیایی مشابه دارند چون خواص شیمیایی وابسته به تعداد الکترون‌ها است که در یک اتم خنثی با تعداد پروتون‌ها برابر است. وقتی ترکیبی از نوترون‌ها و پروتون‌ها بوجود آید که قبلا در طبیعت وجود نداشته است، این محصول یک ایزوتوپ مصنوعی خواهد بود به طوریکه حتی در حالت پایه هم ناپایدار است. این هسته‌های ناپایدار را، هسته‌های پرتوزا، ایزوتوپ رادیو اکتیو یا رادیوایزوتوپ می‌نامند. هسته‌های پرتوزا با تابش امواج الکترومغناطیسی و یا ذرات باردار به پایداری می‌رسند. تابش امواج الکترومغناطیسی و یا ذرات باردار را واپاشی پرتوزا می‌نامند. دو نوع نیرو، نیروی قوی و نیروی الکترومغناطیسی تعیین‌کنندگان پایداری هسته می‌باشند. نیروهای قوی بین جفت

نوکلئون‌ها مانند پروتون-پروتون، پروتون-نوترون یا نوترون-نوترون عمل می‌کنند. این نیروها جاذب هستند و تنها وقتی فاصله بین دو نوکلئون خیلی کم است عمل می‌کنند. نیروهای الکترومغناطیسی بین پروتون‌ها وجود دارند(به علت آنکه نوترون‌ها بار ندارند)و دافع هستند. توازن بین این دو نیرو -یکی جاذبه و دیگری دافعه- پایداری هسته را تعیین می‌کند. هرگاه توازن بین این دو نیرو بهم بخورد، هسته ناپایدار و بنابراین پرتوزا می‌شود [۱].

۱-۲: کشف آهن

در بین فلزات از نظر فراوانی در طبیعت، آهن در مقام دوم پس از آلومینیوم قرار دارد. اما آهن خالص در طبیعت بسیار کمیاب است. آهن به سادگی در مجاورت آب و هوا اکسید می‌شود. به همین دلیل در اکثر موارد به صورت اکسید در طبیعت یافت می‌گردد. بشر آهن را در حدود پنج هزار سال پیش کشف کرد. آهن عنصری است که در جدول تناوبی با نشان Fe و عدد اتمی ۲۶ در گروه ۸ و ردیف ۴ جدول تناوبی قرار دارد. آهن چهارمین عنصر موجود در پوسته زمین از نظر فراوانی است و میزان آن در پوسته زمین در حدود پنج درصد می‌باشد. این عنصر از سنگ معدن هماتیت که عمدتاً Fe_2O_3 می‌باشد استخراج می‌گردد. استخراج فلز آهن از سنگ آهن با یک عمل شیمیایی انجام می‌گیرد. به این معنی که سنگ‌های اکسید آهن بوسیله کربن، احیا و عنصر آن آزاد می‌شود. تاکنون ۲۸ ایزوتوپ آهن از $A=۴۵$ تا $A=۷۲$ کشف شده اند، که چهار ایزوتوپ پایدار، ده ایزوتوپ با پروتون اضافی و چهارده ایزوتوپ با نوترون اضافی را شامل می‌شود. بیشتر از ۶۰٪ کل ایزوتوپ‌های ممکن آهن تا به حال تولید و شناخته شده‌اند. ایزوتوپ‌های پایدار آهن با استفاده از طیف‌نمایی جرمی^۱ (MS) تشخیص داده شده‌اند. ایزوتوپ‌های آهن رادیو اکتیو با استفاده از تبخیر شکافت هسته سنگین^۲ (FE)، واکنش‌های با هسته‌های سبک^۳ (LP)،

^۱ Mass spectroscopy

^۲ Heavy-ion fusion evaporation

واکنش‌های واپاشی^۴ (SP)، واکنش‌های غیر کشسان با آزاد کردن انرژی زیاد^۵ (DI) و پاره‌های شکافت حاصل از ذره فرودی یا شکافت القایی^۶ (PF) تولید می‌شوند. آهن طبیعی شامل چهار ایزوتوپ، آهن-۵۴ با فراوانی ۵/۸ در صد، آهن-۵۶ با فراوانی ۹۱/۸ در صد، آهن-۵۷ با فراوانی ۲/۱۵ در صد و آهن-۵۸ با فراوانی ۰/۲۹ در صد می‌باشد [۲].

۱-۳: خواص شیمیایی و بیولوژیکی

ویژگی‌های شیمیایی عنصر آهن در جدول (۱-۱) نشان داده شده است.

جدول (۱-۱): ویژگی‌های آهن

عدد اتمی	۲۶
چگالی	۷۸۷۴ (kg/m ³)
وزن اتمی	۸۴۵/۵۵amu (g/mol)
آرایش الکترونی	[Ar]3d ⁶ 4s ²
حالت اکسیداسیون	۲, ۳, ۴, ۶* (amphoteric)
حالت ماده	جامد (فرومغناطیس)
نقطه ذوب	۱۸۱۸ K

*دو خصلتی، دارای خاصیت اسید و باز

³Light-particle reactions

⁴Spallation reaction

⁵Deep-inelastic reactions

⁶Projectile fragmentation or fission

محدودیت‌ها:

تابش سطحی ^{55}Fe انرژی پایینی دارد و خطرناک نیست. به طور عموم، حدود ۷۰٪ از کل بدن یک مرد بالغ از آهن تشکیل شده است که در هموگلوبین خون ذخیره شده است. اما برای پذیرش یا جذب ^{55}Fe یک محدودیت سالیانه تعریف شده است که به این صورت می‌باشد.

فرو بردن یا بلعیدن ^{55}Fe از راه دهان $\leftarrow 9 \text{ mci}$

استنشاق کردن ^{55}Fe $\leftarrow 2 \text{ mci}$

غلظت هوای شامل ^{55}Fe $\leftarrow 8 \times 10^{-7} \mu\text{ci/ml}$

از مقدار کل ^{55}Fe جذب شده توسط بدن، ۸۰٪ به کبد و ۱۳٪ از آن به طحال منتقل می‌شود و باقیمانده آن به طور یکنواخت در کل اندام‌ها و بافت‌ها توزیع می‌شود. آهن با نیمه عمر بیولوژیکی ۲۰۰۰ روز حکم نگهدارنده در اندام‌ها و بافت‌ها را دارد. یک یا دو درصد از ^{55}Fe جذب شده در طول ۲۴ ساعت اول توسط ادرار و مابقی توسط مدفوع دفع می‌شود.

۱-۴: آهن-۵۵ و کاربردهای آن

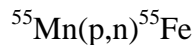
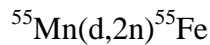
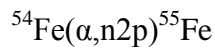
رادیوایزوتوپ آهن-۵۵ بوسیله گیراندازی الکترون (EC^{γ}) واپاشی می‌کند و بیشترین تابش گسیلی آن، پرتو ایکس $\text{K}\alpha$ با انرژی $5/89 \text{ keV}$ می‌باشد. این رادیوایزوتوپ بعنوان چشمه استاندارد برای آشکارسازهای پرتو ایکس استفاده می‌شود [۳] و کاربردهای متفاوتی دارد. برای مثال در زمینه پزشکی، در مطالعات جذب و متابولیسم آهن در بدن انسان استفاده می‌شود [۴] و یا در زمینه صنعتی، برای اندازه-گیری شدت تابش فلورسان پس پراکنده و برانگیخته جهت تعیین محتوای خاک در نمونه‌های زغال

⁷Electron Capture

سنگ به کار برده می‌شود [۵] و همچنین در زمینه کشاورزی، برای بررسی جذب املاح در گیاهان استفاده می‌شود [۶].

۱-۵: تولید رادیونوکلئید آهن-۵۵

این رادیوایزوتوپ تحت واکنش‌های متفاوتی تولید می‌شود که به شرح ذیل معرفی می‌شود:



تولید سیکلوترونی ^{55}Fe از واکنش‌های هسته‌ای مذکور به این دلیل است که واکنش‌های مناسبی برای سیکلوترون‌های با انرژی متوسط یا پایین هستند. در این تحقیق واکنش‌های سیکلوترونی با پرتابه‌های فرودی روی هدف‌های متفاوت با تولید محصول مشترک ^{55}Fe را مورد بررسی قرار داده‌ایم و پارامترهای تولید رادیوایزوتوپ ^{55}Fe بوسیله پرتوهای سیکلوترون را بررسی کرده‌ایم.

۱-۶: هدف از این تحقیق

همانطور که اشاره شد، کاربرد آهن-۵۵ در صنعت، کشاورزی و پزشکی 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 بهینه تولید؛ به بررسی سطح مقطع تولید واکنش‌های مختلف می‌پردازیم.

این داده‌های هسته‌ای با استفاده از مدل‌های گوناگون واکنش‌های هسته‌ای در دامنه‌های مختلف انرژی ذره ورودی و برای هسته‌ها و پرتابه‌های مختلف، بوسیله کدهای هسته‌ای که به این منظور نوشته شده اند؛ به دست می آیند. کدهای مختلفی (ALICE, TALYS, EMPIRE, GNASH) برای تولید داده‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت کد TALYS1.2, EMPIRE3.1 و ALICE/ASH برای این منظور انتخاب شد. بعد از محاسبه سطوح مقطع و بهره تولید واکنش‌های مورد نظر؛ واکنش مناسب (با توجه به امکانات موجود) انتخاب و شرایط بهینه تولید بررسی می‌شود.

در مرحله بعد با توجه به شرایط بهینه، طراحی هدفی که بتواند این شرایط را تامین کند و در عین حال مقاومت بالایی در برابر اثرات مخرب تابش داشته باشد؛ بررسی می‌شود. آزمایشات متعددی برای توسعه روش رسوب نشانی در طراحی این هدف و کنترل کیفی آن انجام گرفت. در پایان برای بررسی مقاومت هدف در شرایط واقعی و اندازه‌گیری میزان بهره تولید ^{55}Fe ؛ نمونه‌ای از هدف لایه نشانی شده، توسط سیکلوترون موجود در پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی کرج مورد تابش پروتون با انرژی 18 MeV و با جریان $20 \mu\text{A}$ به مدت 3 ساعت و 18 دقیقه قرار گرفت.

فصل دوم:

تئوری تولید رادیونوکلئید