



دانشکده علوم پایه-گروه فیزیک

عنوان پایان نامه:

اندازه گیری توزیع شار نوترون حرارتی در فانتوم پارافین

ارائه شده جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

اساتید راهنما:

دکتر سید هاشم میری حکیم آباد

دکتر رفعت متولی

نگارنده:

پریسا اخلاقی

شهریور ۸۹

به راه‌بادیه رفتن به از نشستن باطل

که گر مراد نیابم، به قدر وسع بگو شوم...

به:

پدرو مادر نازنینم

مشکر و قدردانی

سپاس ایندمنان را که در این راه یاریم نمود تا با کام نهادن در طریق علم دست زندگی کردن را بیاموزم. در ابتدا از پدر و مادر عزیز و

مهربانم که در تمام مراحل زندگی یار و یاورم بودند و موفقیت های خود را مرهون پشتیبانی های آن ها هستم، بسیار سپاسگزارم. همچنین از

استاد محترم جناب آقای دکتر سید هاشم میری و سرکار خانم دکتر لاله رفعت متولی که با صبر و شکیبایی فراوان مراد تبه این رساله

بمراهی کردند و استاد بزرگوار آقایان دکتر کوروش جاویدان و دکتر سعید محمدی که با حضور خود در جلسه دفاع، زحمت داوری رساله

اینجانب را تقبل کردند کمال مشکر را دارم. در نهایت از دوستان عزیزم خانم باعطیه ابراهیمی، نجمه محمدی، نفیسه عراقیان، یاسمن

رضایی مقدم و راضیه تقی آبادی که در طول دوره کارشناسی ارشد با نظرات مفید خود مرا یاری کردند، نیز قدردانم.

چکیده

برای آشکارسازی و اندازه‌گیری شار نوترون‌های مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش مستقیم، آشکارسازها به ازای هر نوترونی که آشکار می‌کنند، پالسی ایجاد می‌نمایند و در روش غیر مستقیم، اندازه‌گیری‌های شار نوترون از طریق فعالیت القایی توسط برهم‌کنش‌های نوترونی انجام می‌شود. انواع مختلفی از برهم‌کنش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که به دو گروه واکنش‌های جذبی و پراکندگی تقسیم می‌شوند. واکنش‌های جذبی عبارتند از (n,α) ، (n,p) ، (n,γ) یا (شکافت، n). واکنش پراکندگی عمده‌ای که استفاده می‌شود برخورد نوترون-پروتون موسوم به روش پس‌زنی پروتون است. در این روش ذره‌ای که ثبت می‌شود پروتون ضربدیده است. روشی که در این رساله استفاده شده، روش غیر مستقیم آشکارسازی با پولک‌های فلزی، می‌باشد و توسط بتا و گامای ساطع شده، شار نوترون به دست می‌آید.

یکی از مهم‌ترین مطالعات در این زمینه، یکنواختی فعالسازی است یعنی تمام نقاط نمونه به طور یکنواخت توسط نوترون فعال شوند و احتمال فعال شدن در تمام نقاط نمونه یکسان باشد. که این موضوع در دانشگاه فردوسی مشهد بررسی می‌شود.

هدف از این رساله اندازه‌گیری شار نوترون‌های حرارتی در فانتوم پارافین با استفاده از بتا و گامای گسیل شده از پولک ایندیوم می‌باشد و یکنواخت بودن شار نوترون با اندازه‌گیری و محاسبه توسط کد MCNP بررسی می‌شود.

کلید واژه: شار نوترون حرارتی، پولک ایندیوم، روش تفاوت کادمیوم، فعالیت القایی، گاما و بتای

گسیلی

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول: روش فعالسازی	
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تعریف روش فعالسازی پولک	۲
۳-۱ نمونه‌هایی از اندازه‌گیری شار با پولک	۶
۱-۳-۱ اندازه‌گیری شار نوترون‌های حاصل از راکتور HFIR	۷
۲-۳-۱ اندازه‌گیری شار نوترون در راکتور LVR-۱۵	۹
۳-۳-۱ اندازه‌گیری شار نوترون‌های حرارتی راکتور ET-RR-۱	۱۰
۴-۳-۱ اندازه‌گیری چگالی شار نوترون‌های حرارتی با پولک طلا	۱۱
۵-۳-۱ اندازه‌گیری شار نوترون‌های حرارتی چشمه ^{252}Cf	۱۴
۶-۳-۱ اندازه‌گیری شار نوترون در SINQ	۱۶
فصل دوم: اندازه‌گیری شار	
۱-۲ مقدمه	۱۸
۲-۲ آشکارسازی نوترون با فعالسازی پولک	۱۸
۳-۲ خصوصیات پولک‌ها	۲۱
۴-۲ محصولات فعالسازی	۲۵
۵-۲ اندازه‌گیری شار	۲۷
۶-۲ محاسبه تصحیحات اعمال شده	۳۴

۳۴	۱-۶-۲ ضریب خودحفاظی حرارتی G_{th}
۳۶	۲-۶-۲ ضریب g
۳۷	۳-۶-۲ ضریب تصحیح برای حالت با پوشش کادمیوم.....
۳۸	۴-۶-۲ ضریب تصحیح مربوط به احتمال شمارش توسط آشکارساز.....
۳۹	۵-۶-۲ احتمال گسیل I_β و I_γ
۴۰	۷-۲ پولک ایندیوم.....

فصل سوم: آشکارسازی پرتوهای ثانویه توسط آشکارساز گایگر-مولر

۴۵	۱-۳ مقدمه.....
۴۵	۲-۳ آشکارساز گایگر - مولر.....
۴۷	۱-۲-۳ گاز مورد استفاده در آشکارساز.....
۴۸	۳-۳ مشخصات چشمه.....
۵۳	۴-۳ تئوری آزمایش فعالسازی نوترونی.....
۵۷	۱-۴-۳ ضرایب تصحیح.....
۵۸	۲-۴-۳ خطای آماری داده‌ها.....
۶۰	۵-۳ روش آزمایش فعالسازی نوترونی.....
۶۱	۱-۵-۳ نتایج آزمایش.....
۶۵	۶-۳ شبیه‌سازی با کد MCNP.....
۶۵	۱-۶-۳ برنامه ورودی.....
۶۹	۷-۳ محاسبه شار.....

۶۹	..... محاسبه ۴
۷۲	..... تعیین مقدار F_{Cd}
۷۵	..... نتایج نهایی

فصل چهارم: طیف‌سنجی پرتوهای گامای ثانویه توسط آشکارساز NaI(Tl)

۸۱	..... مقدمه ۱-۴
۸۱	..... آشکارساز سوسوزن
۸۲	..... سوسوزن غیرآلی NaI(Tl) ۱-۲-۴
۸۴	..... فوتومولتی پلایر ۲-۲-۴
۸۵	..... آشکارسازی با NaI(Tl) ۳-۴
۸۶	..... اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی توسط طیف‌سنجی پرتوهای گامای ثانویه ۴-۴
۸۹	..... مدرج کردن MCA ۱-۴-۴
۹۱	..... روش استفاده از MCA ۵-۴
۹۳	..... نتایج آزمایش ۶-۴
۹۷	..... برآورد شار نوترون حرارتی ۷-۴

فصل پنجم: مقایسه داده‌های تجربی با محاسبه

۱۰۵	..... مقدمه ۱-۵
۱۰۵	..... مقایسه داده‌های تجربی ۲-۵
۱۰۶	..... محاسبه شار نوترون حرارتی ۳-۵
۱۰۶	..... شبیه‌سازی ۱-۳-۵

۴-۵ مقایسه و نتیجه گیری ۱۱۲

پیوست ۱۱۴

مراجع ۱۱۶

فهرست تصاویر

عنوان	شماره صفحه
شکل ۱-۱ شار نوترون حرارتی اندازه‌گیری شده بر حسب عمق توسط پولک طلا و آشکارساز Si-Li. ۱۲	۱۲
شکل ۱-۲ شار نوترون حرارتی بر حسب فاصله از سطح ۱۲	۱۲
شکل ۱-۳ شار نوترون فوق حرارتی بر حسب فاصله از سطح ۱۳	۱۳
شکل ۲-۲ پاسخ انرژی چند نوع پولک ۲۴	۲۴
شکل ۲-۳ فعالیت کل بر حسب فعالیت اشباع ۳۳	۳۳
شکل ۲-۴ ضریب خودحفاظتی تعدادی از پولک‌ها ۳۶	۳۶
شکل ۲-۵ نمودار فراوانی بر حسب انرژی در پولک ایندیوم ۴۰	۴۰
شکل ۲-۶ سطح مقطع جذب نوترون در ^{115}In ۴۱	۴۱
شکل ۲-۷ طرحواره واپاشی ^{116m}In ۴۲	۴۲
شکل ۲-۸ سطح مقطع جذب نوترون در ^{113}In ۴۳	۴۳
شکل ۲-۹ پولک‌های ایندیوم و کادمیوم ۴۳	۴۳
شکل ۳-۱ شمارشگر گایگر ۴۷	۴۷
شکل ۳-۲ چشمه Am-Be، مخزن پارافین و مکان پولک‌ها ۵۱	۵۱
شکل ۳-۳ استوانه پلکسی‌گلس که پولک‌ها در آن قرار می‌گیرند ۵۲	۵۲
شکل ۳-۴ طیف انرژی نوترون‌های چشمه Am-Be ۵۳	۵۳
شکل ۳-۵ چیدمان آزمایش اندازه‌گیری شار با استفاده از گایگر ۶۱	۶۱
شکل ۳-۶ پولک در مقابل شمارشگر گایگر ۶۲	۶۲

- شکل ۳-۷ چیدمان آزمایش فعالسازی با شمارشگر گایگر ۶۹
- شکل ۳-۸ پرتوهای وارد شده به آشکارساز گایگر-مولر ۷۵
- شکل ۳-۹ نمودار $\ln(N)$ بر حسب t برای پولک ۱ ۸۱
- شکل ۳-۱۰ نمودار $\ln(N)$ بر حسب t برای پولک ۱ ۸۳
- شکل ۴-۱ PMT ۸۹
- شکل ۴-۲ سطح مقطع جذب گاما از (n,γ) در ^{115}In ۹۱
- شکل ۴-۳ سطح مقطع جذب (نوترون و گاما) در ^{113}In ۹۱
- شکل ۴-۴ چیدمان آزمایش فعالسازی نوترونی با آشکارساز NaI(Tl) ۹۲
- شکل ۴-۵ منحنی فراوانی بر حسب انرژی پرتوهای گامای ساطع شده از پولک ایندیوم ۹۲
- شکل ۴-۶ طیف انرژی گاماها گسیل شده از دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs ۹۳
- شکل ۴-۷ رابطه انرژی و کانال ۹۵
- شکل ۴-۸ پولک ایندیوم در مقابل آشکارساز NaI(Tl) ۹۸
- شکل ۴-۹ نمودار فراوانی بر حسب انرژی برای پولک ۱ بدون پوشش کادمیوم ۹۹
- شکل ۴-۱۰ نمودار فراوانی بر حسب انرژی برای پولک ۱ با پوشش کادمیوم ۹۹
- شکل ۴-۱۱ نمودار فراوانی بر حسب انرژی برای پولک ۲ با پوشش کادمیوم ۱۰۰
- شکل ۴-۱۲ نمودار فراوانی بر حسب انرژی برای پولک ۲ بدون پوشش کادمیوم ۱۰۰
- شکل ۴-۱۳ نمودار تالی F8 بر حسب انرژی ۱۰۷

فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۱ مشخصات تعدادی از واکنش‌های فعالسازی نوترونی	۵
جدول ۲-۱ داده‌های برهم‌کنش برای آشکارسازی نوترون‌های حرارتی	۸
جدول ۳-۱ داده‌های برهم‌کنش برای آشکارسازی نوترون‌های سریع	۸
جدول ۴-۱ ضریب خودحفاظی و ضخامت پولک‌ها	۹
جدول ۱-۲ مواد مناسب به‌عنوان آشکارسازهای فعالسازی نوترون حرارتی	۲۰
جدول ۲-۲ کسری از فعالیت اشباع تولید شده برحسب زمان پرتودهی	۳۲
جدول ۱-۳ پرتوهای بتای گسیل شده از ایندیوم و فراوانی آنها	۵۷
جدول ۲-۳ ابعاد پولک‌ها	۶۰
جدول ۳-۳ نتایج آزمایش بر روی پولک ۱ با پوشش کادمیوم	۶۳
جدول ۴-۳ نتایج آزمایش بر روی پولک ۱ بدون پوشش کادمیوم	۶۳
جدول ۵-۳ نتایج نهایی دو مرحله برای پولک ۱	۶۳
جدول ۶-۳ نتایج آزمایش بر روی پولک ۲ با پوشش کادمیوم	۶۴
جدول ۷-۳ نتایج آزمایش بر روی پولک ۲ بدون پوشش کادمیوم	۶۴
جدول ۸-۳ نتایج نهایی دو مرحله برای پولک ۲	۶۴
جدول ۹-۳ خروجی‌های برنامه	۶۹
جدول ۱۰-۳ مقدار F_{Cd} برای چشمه نقطه‌ای	۷۴
جدول ۱۱-۳ مقدار F_{Cd} برای چشمه سطحی	۷۴

- جدول ۳-۱۲ مقدار F_{Cd} برای چشمه به صورت باریکه موازی ۷۵
- جدول ۴-۱ انرژی و فراوانی گاماهاى ساطع شده از ایندیوم ۹۰
- جدول ۴-۲ سطح زیر منحنی و خطای آنها برای پولک‌های ۱ و ۲ در هر دو حالت ۹۷
- جدول ۵-۱ نتایج آزمایش با گایگر و NaI(Tl) ۱۰۵
- جدول ۵-۲ شار نوترون به ازای یک ذره فرودی ۱۱۱
- جدول ۵-۳ شار نوترون در محل پولک با شبیه‌سازی ۱۱۲
- جدول ۵-۴ مقایسه شار نوترون به دست آمده با ۳ روش ۱۱۲

فصل اول

روش فعالسازی

۱-۱ مقدمه

۲-۱ تعریف روش فعالسازی

۳-۱ نمونه‌هایی از اندازه‌گیری شار با پولک

۱-۱ مقدمه

یکی از روش‌های شناسایی یک یا چند جزء یا عنصر موجود در نمونه (شناسایی مواد) روش فعالسازی نوترونی (NAA)^۱ می‌باشد که با استفاده از گاما یا بتای خارج شده از نمونه تحت تابش قرار گرفته، شار نوترون فرودی را به دست می‌آوریم. روش مناسب برای تعیین سهم نوترون حرارتی، استفاده از خاصیت جذب نوترون‌های حرارتی کادمیوم است زیرا کادمیوم به طور موثر تمام نوترون‌های با انرژی کمتر از 0.5 eV را جذب می‌کند و نوترون‌های با انرژی بالاتر از 1 eV را عبور می‌دهد [۱-۳]. در این فصل به بررسی روش فعالسازی در اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی پرداخته می‌شود.

۲-۱ تعریف روش فعالسازی پولک

تحلیل به روش فعالسازی تحلیلی کمی و کیفی است. در این روش نمونه تحت تابش نوترون قرار می‌گیرد. در اثر برخورد نوترون‌ها با هسته‌های عناصر موجود در نمونه، هسته‌ها برانگیخته می‌شوند و پس از مدتی در برگشت به حالت اولیه خود، پرتوهای گاما یا بتا و یا هردو را گسیل می‌کنند. پرتوهای گاما مشخصه خاص هر عنصر می‌باشند که با استفاده از سیستم آشکارسازی و طیف سنجی پرتوهای گاما، تجزیه و تحلیل می‌شوند. روشی که برای گاما استفاده می‌شود،

^۱ Neutron Activation Analysis

اصطلاحاً DGNAA^۲ نامیده می‌شود که با استفاده از گاما‌های تاخیری، شار نوترون به دست می‌آید. با اندازه‌گیری فعالیت، اطلاعاتی در مورد توزیع انرژی و تعداد نوترون‌ها به دست می‌آید. همچنین با اندازه‌گیری تعداد بتاهای رسیده به آشکارساز و روابط مربوطه می‌توان شار نوترون حرارتی را به دست آورد [۴]. علاوه بر این، حتی اگر عنصر تحت تابش قرار گرفته معلوم نباشد، با اندازه‌گیری انرژی گاما نوع ایزوتوپ گسیلنده آن مشخص می‌شود و با تعیین تعداد پرتوهای گامای آشکار شده از یک انرژی خاص، می‌توان جرم ایزوتوپی که این گاما را گسیل کرده است را برآورد کرد.

بسیاری از واکنش‌های نوترونی منجر به گسیل گاما می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها فرآیند گیراندازی نوترون (n, γ) است. این فرآیند متداول‌ترین واکنش نوترونی است و تقریباً با همه ایزوتوپ‌ها (هرچند با احتمال‌های مختلف) انجام می‌شود. به طور کلی سطح مقطع واکنش (σ) برای نوترون‌های حرارتی بیش از نوترون‌های سریع است؛ زیرا سرعت نوترون حرارتی نسبت به سریع کمتر می‌باشد و هسته آن را در مدت زمان بیشتری می‌بیند.

هسته‌ای که با گیراندازی نوترون ایجاد می‌شود، هسته مرکب نام دارد که اگر طول عمر خیلی کوتاهی داشته باشد (در حدود 10^{-14} sec)، به گامایی که گسیل می‌شود اصطلاحاً گامای آنی گفته می‌شود و اگر دارای نیمه عمری از مرتبه چند دقیقه یا بیشتر باشد این نوع گاما، گامای تاخیری نامیده می‌شود.

بسته به نوع واکنش انتخاب شده، می‌توان پرتوهای پولک را در یک راکتور، یک شتابدهنده یا یک چشمه رادیوایزوتوپی انجام داد. زمان مناسب برای پرتوهای با توجه به نیمه عمر پولک انتخاب می‌شود که در فصل‌های بعد بررسی خواهد شد. پس از این که پرتوهای نمونه کامل شد، پولک را با دستگاه مناسبی می‌شمارند. دستگاه شمارش به تابشی که آشکار می‌شود بستگی

^۲ Delayed Gama Neutron Activation Analysis

دارد. دستگاه‌های نوین تحلیل فعالیت پولک براساس آشکارسازی گاما و X ساخته شده‌اند و کمتر از آشکارسازی ذرات دیگر استفاده می‌شود.

البته نمی‌توان خطاهای استفاده از این روش برای محاسبه شار نوترون یا تحلیل به روش فعالسازی را نادیده گرفت. یکی از عوامل ایجاد کننده خطا واکنش‌های تداخلی است که از طریق بمباران ایزوتوپ دیگری در هدف، همان ایزوتوپی را تولید می‌کنند که گامای آن شمارش می‌شود. حتی ممکن است ایزوتوپ‌های دیگری تولید کند که نیمه‌عمری در حد، ایزوتوپ اصلی داشته باشد. اگر چنین باشد و ما واکنش‌های تداخلی را در نظر نگیریم، شمارش بیشتر از آنچه که هست خواهد شد. علاوه بر این موارد تغییرات HV، نویز، پرتوهای زمینه هم وجود دارد. خطای سیستماتیک را هم نباید از یاد برد.

سطح مقطع فعالسازی پولک‌ها در ناحیه حرارتی تقریباً به صورت $\frac{1}{v}$ است که v سرعت نوترون می‌باشد. یعنی سطح مقطع جذب با افزایش انرژی نوترون کاهش می‌یابد (تعدادی از پولک‌ها از این قاعده پیروی نمی‌کنند که این موضوع در ادامه توضیح داده می‌شود). در سطح مقطع بعضی از پولک‌ها تشدیدهایی در بازه انرژی 1-1000 eV دیده می‌شود. بنابراین فعالیت مخلوطی از سهم نوترون‌های حرارتی و نوترون‌های فوق حرارتی است. روشی که معمولاً برای اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی به کار می‌رود روش تفاوت کادمیوم است. کادمیوم نوترون‌های حرارتی را جذب می‌کند و نوترون‌های فوق حرارتی را عبور می‌دهد، پس تفاوت شار در پولک با پوشش و بدون پوشش کادمیوم شار نوترون حرارتی را می‌دهد [5]. انرژی قطع کادمیوم، 0.5 eV می‌باشد و تقریباً تمام نوترون‌های با انرژی کمتر از 0.5 eV را جذب می‌کند و فقط $\frac{1}{3}$ نوترون‌های حرارتی از سد کادمیوم عبور می‌کنند. معمولاً کادمیومی که استفاده می‌شود، ضخامتی حدود 0.7 mm دارد.

فصل اول : روش فعالسازی پولک

در جدول ۱-۱ اطلاعاتی در مورد چند نوع واکنش فعالسازی نوترونی، انرژی آستانه برای انجام واکنش، نیمه عمر هسته دختر و تابش گسیلی از آن داده شده است.

جدول ۱-۱ مشخصات تعدادی از واکنش‌های فعالسازی نوترونی

ماده	برهم کنش	انرژی آستانه (MeV)	نیمه عمر محصول	نوع تابش گسیلی و انرژی آن
آلومینیوم	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	(-)	۲/۳ min	$\beta^-(2/85), \gamma(1/87)$
	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	۱/۹	۹/۴۶ min	$\beta^-(1/75), \gamma(1/04, 1/13)$
	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	۳/۲۷	۱۵ h	$\beta^-(1/38), \gamma(1/36, 2/75)$
آرسنیک	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$	(-)	۲۶/۴ h	$\beta^-(2/97), \gamma(0/559)$
	$^{75}\text{As}(n,\alpha)^{72}\text{Ga}$	(-)	۱۴/۱ h	$\beta^-(3/15), \gamma(0/835)$
	$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$	۸/۲۷	۱۷/۹ d	$\beta^-(3/15), \gamma(0/835)$
کادمیوم	$^{110}\text{Cd}(n,\gamma)^{111}\text{Cd}$	(-)	۴۸/۶ min	$e^-, \gamma(0/247)$
	$^{110}\text{Cd}(n,p)^{110}\text{Ag}$	۲/۱۲	۲۳۵ d	$\gamma(0/685)$
کلسیم	$^{48}\text{Ca}(n,\gamma)^{49}\text{Ca}$	(-)	۸/۸ min	$\gamma(3/07), \beta(1/95)$
کلر	$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$	(-)	۳۷/۲ min	$\beta^-(4/91), \gamma(1/6, 2/17)$
	$^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$	۳/۶	۵ min	$\beta^-, \gamma(3/09)$
مس	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	۱۱/۰۱	۹/۷۶ min	$\gamma(0/511)$
فلوئور	$^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$	۱/۵۷	۷/۱۵ sec	$\gamma(6/13)$
طلا	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	(-)	۲/۷ d	$\beta^-(0/962), \gamma(0/412)$
	$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	۷/۳۶	۶/۱۸	$\beta^-, \gamma(0/356)$
ید	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$	(-)	۲۵ min	$\beta^-(2/12), \gamma(0/441)$
آهن	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	(-)	۴۵/۵ d	$\beta^-, \gamma(1/095, 1/292)$
	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	۲/۹۸	۲/۵۷ d	$\beta^-, \gamma(0/847)$
سرب	$^{208}\text{Pb}(n,2n)^{207}\text{Pb}$	۷/۴۵	۰/۸۸۵ sec	$\gamma(0/570)$

ماده	برهم کنش	انرژی آستانه	نیمه عمر	نوع تابش گسیلی و انرژی
جیوه	$^{200}\text{Hg}(n,2n)^{199}\text{Hg}$	۸/۱۱	۴۳ min	$\gamma(0/158)$
	$^{196}\text{Hg}(n,\gamma)^{197}\text{Hg}$	(-)	۶۵ h	$\gamma(0/077)$
	$^{202}\text{Hg}(n,\gamma)^{203}\text{Hg}$	(-)	۴۶/۹ d	$\gamma(0/279)$
نیکل	$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	۱۲/۰۹	۳۶ h	$\beta^+, \gamma(0/511, 1/37)$
نیتروژن	$^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$	۱۱/۳۱	۱۰ min	$\gamma(0/511)$
اکسیژن	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{O}$	۱۰/۲	۷/۱ sec	$\gamma(6/13)$
فسفر	$^{31}\text{P}(n,\alpha)^{28}\text{Al}$	۲	۲/۳ min	$\beta^-, \gamma(1/78)$
پتاسیم	$^{39}\text{K}(n,2n)^{38}\text{K}$	۱۳/۴۱	۷/۷ min	$\gamma(0/511, 2/17)$
سیلیسیم	$^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$	۳/۹۹	۲/۳ min	$\gamma(1/78)$
نقره	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110}\text{Ag}$	(-)	۲۴ sec	$\gamma(0/66)$

۳-۱ نمونه‌هایی از اندازه‌گیری شار با پولک

اصول کلی تحلیل به روش فعالسازی کار تازه‌ای نیست و برای اولین بار در سال ۱۹۳۶ توسط هوسی و لوی^۳ انجام گرفت. Dy موجود در نمونه را وقتی با نوترون‌های چشمه Ra-Be بمباران کردند، پرتوزا شد و توانستند مقدار Dy را در یک نمونه Ir اندازه‌گیری کنند [۶]. دو سال بعد، در سال ۱۹۳۸، سیبورگ و لیوینگود^۴ مقدار Ga موجود در یک نمونه آهن را با بمباران آن توسط هسته‌های دوترون تعیین کردند.

با فراهم شدن شارهای نوترونی بالا از راکتورهای هسته‌ای، حساسیت این روش به‌طور چشمگیری افزایش یافت. اگرچه ذرات باردار، پرتوهای گاما و نوترون‌های ۱۴ MeV را می‌توان

^۳ Hevesy, G. and Levi

^۴ Seaborg, G.T. and Livingood

به‌عنوان ذرات بمباران کننده مورد استفاده قرار داد، اما نوترون‌های حرارتی بیشترین کاربرد را در پرتودهی نمونه دارند زیرا معمولا سطح مقطع جذب برای نوترون‌های حرارتی بیشتر است و برای انجام برهم‌کنش به انرژی آستانه نیاز ندارند.

امروزه تحلیل به روش فعالسازی نوترونی به یک ابزار حیاتی در زمینه‌های مختلف از علوم و مهندسی تا صنعت و پزشکی و محیط زیست و حتی در جرم‌شناسی تبدیل شده است و برای اطلاعات بیشتر در مورد کاربردهای این روش می‌توان به کتاب‌ها و مقالاتی که در این زمینه وجود دارند مراجعه کرد [۷-۱۱].

۱-۳-۱ اندازه‌گیری شار نوترون‌های حاصل از راکتور HFIR

در آزمایشگاه انرژی اتمی آمریکا (OAK RIDGE) در سال ۱۹۶۸ برای اندازه‌گیری شار نوترون‌های سریع، تشدید و حرارتی از پولک‌ها استفاده کردند. اطلاعات مربوط به پولک‌های استفاده شده در این آزمایشگاه در جدول ۱-۲ و ۱-۳، ضخامت و ضریب خودجذبی حرارتی این پولک‌ها (در ادامه توضیح داده می‌شود)، در جدول ۱-۴ داده شده است.

آشکارسازها در فاصله ۸۸ mm از چشمه نوترون، قرار گرفتند و با پوشش‌های کادمیومی با ضخامت ۰/۵ mm پوشیده شدند. تمامی پولک‌ها به جز سولفور در دو شمارشگر کریستالی NaI شمارش می شدند. این شمارشگرها از مقایسه با یک شار نوترون شناخته شده کالیبره شده و در نهایت شار نوترون با استفاده از روابط زیر به دست آمد:

$$\Phi = \frac{M\lambda C}{N\bar{\sigma}\omega\varepsilon(1 - e^{-\lambda t_1})e^{-\lambda t_r}(1 - e^{-\lambda t_2})} \quad 1 - 1$$

که در این رابطه M وزن اتمی ایزوتوپ هدف، λ ثابت واپاشی ایزوتوپ محصول، C شمارش خالص برای زمان t_p ، N عدد آووگادرو، $\bar{\sigma}$ سطح مقطع فعالسازی در 2200 m/s ، w وزن ایزوتوپ هدف، ε بازده شمارنده برای ایزوتوپ محصول، t_1 زمان پرتودهی، t_2 زمان شمارش و t_3 زمان واپاشی می‌باشد [۱۲].

جدول ۱-۲ داده‌های برهم‌کنش برای آشکارسازی نوترون‌های حرارتی

برهم‌کنش	نیمه عمر	آستانه موثر (MeV)	سطح مقطع (barns)
$^{23}\text{Na} (n,\gamma) ^{24}\text{Na}$	۱۵ h	حرارتی	0.7536 ± 0.1
$^{63}\text{Cu} (n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$	۱۲/۸۲ h	حرارتی	4.3 ± 0.2
$^{59}\text{Co} (n,\gamma) ^{60}\text{Co}$	۵/۲۹ y	حرارتی	37 ± 1.5
$^{115}\text{In} (n,\gamma) ^{116}\text{In}$	۵۴/۲ min	حرارتی	155 ± 10
$^{197}\text{Au} (n,\gamma) ^{198}\text{Au}$	۲/۷ d	حرارتی	96 ± 10

جدول ۱-۳ داده‌های برهم‌کنش برای آشکارسازی نوترون‌های سریع

برهم‌کنش	نیمه عمر	آستانه موثر (MeV)	سطح مقطع (barns)
$^{239}\text{Pu} (n, f)$	—	$0.1003 - 0.1005$	۱/۹۴
$^{237}\text{Np} (n, f)$	—	۰/۷۵	۱/۶
$^{238}\text{U} (n, f)$	—	۱/۴	0.525
$^{32}\text{S} (n, p) ^{32}\text{P}$	۱۴/۳ d	۲/۹	0.300
$^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$	۹/۸ min	۴/۶	0.039
$^{24}\text{Mg} (n, p) ^{24}\text{Na}$	۱/۵ h	۶/۳	0.048
$^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na}$	۱۵ h	۸/۱	0.110