

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد
رشته فیزیک هسته‌ای

تعیین فعالیت پولک گسیلنده گامای تأخیری در فعالسازی نوترونی به روش محاسباتی و مقایسه با نتایج تجربی

تحقیق و نگارش

وجیهه مظفری

استاد راهنما

دکتر رضا ایزدی

بهمن ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزتر از جانم

و

همسر مهربانم که در تمام مراحل یاورم بود

و

دو فرزند صبورم

نازنین زهرا و نازنین زینب

تقدیر و تشکر

اکنون که در پرتو الطاف خداوند سبحان این مقطع تحصیلی را به پایان می‌رسانم بر خود وظیفه می‌دانم از زحمات و تلاشهای صادقانه و مؤثر جناب آقای دکتر ایزدی تقدیر و تشکر نمایم.

در مراحل اجرای این پایان نامه آقای حامد پنجه زحمات زیادی را متقبل شدند که از این طریق از زحمات ایشان تشکر می‌کنم.

همچنین در تمام مراحل این کار از راهنمایی‌های بی‌دریغ خانم نجمه محمدی و آقای هاشم جیا و آقای ابراهیمی بهره بردم که از ایشان کمال تشکر را دارم.

وظیفه خود می‌دانم که از جناب آقای افسری‌پور، متصدی آزمایشگاه هسته‌ای که در بخش آزمایشگاهی این پایان نامه زحمات فراوانی را متحمل شدند نیز تشکر کنم.

لازم می‌دانم از همراهی و کمکهای بی‌دریغ خانم عصمت‌مدار و دیگر مسئولین نیز کمال تشکر را داشته باشم.

در این کار دوستان عزیزم خانم‌ها زهرا اکبری و زهرا طباطبایی نیز همواره یاریگر من بودند که لازم می‌دانم از ایشان نیز تشکر نمایم. موفقیت و سربلندی این عزیزان را از درگاه ایزد منان مسئلت دارم.

چکیده

در این تحقیق، که به کمک روش فعالسازی نوترونی انجام شده است، ۱۱ عنصر تحت تابش نوترون قرار گرفتند. مدت زمان تابش نوترون برای هر یک از عناصر به نیمه عمر آن پس از فعال شدن بستگی دارد. برای اطمینان از این که عنصر مورد نظر به حالت اشباع رسیده است در حدود ۵ الی ۶ برابر نیمه عمر رادیو نوکلید فعال شده، در معرض تابش نوترون قرار می‌گیرد. پس از برداشتن عنصر مورد نظر از مقابل چشمه نوترون انرژی گاماها گسیل شده از آنها و نیز مقدار فعالیت این عناصر را با در نظر گرفتن زمان سپری شده میان چشمه نوترون و آشکارساز، اندازه‌گیری می‌کنیم. برای شبیه‌سازی این مراحل از کد MCNPX و چند برنامه فرترن به این شرح استفاده کردیم. برای محاسبه آهنگ تولید هسته‌ها در مقابل چشمه نوترون از کد MCNPX، و برای در نظر گرفتن احتمال واپاشی عنصر مورد نظر در مقابل چشمه نوترون و در مقابل آشکارساز، از دو برنامه فرترن استفاده می‌کنیم. نتیجه به دست آمده از این مراحل مقدار فعالیت عنصر (پولک) مورد نظر است. برای محاسبه مقدار انرژی نیز می‌توانیم از MCNPX استفاده کنیم.

از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی، مقدار انرژی در عناصر مختلف تطبیق بسیار خوبی را مشاهده می‌کنیم. اما در مورد مقدار فعالیت نیاز به بررسی بیشتری داریم.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

- ۱-۱ تحلیل فعالسازی پولک ۱
- ۲-۱ اصول فعالسازی پولک ۴
- ۳-۱ چشمه‌های نوترون ۷
- الف. چشمه‌های رادیوایزوتوپی ۷
- ب. چشمه‌های نوترون حاصل از شتابدهندهها ۸
- ج. چشمه نوترونی شکافت ۹
- ۴-۱ رده‌بندی نوترونها ۹
- ۵-۱ مقایسه‌ی PGNAA با DGNAA ۱۱
- ۱-۵-۱ استفاده از روش DGNAA در BCCA ۱۲
- ۲-۵-۱ استفاده از روش PGNAA در BCCA ۱۲
- ۶-۱ اندازه‌گیری پرتوهای گاما ۱۲
- الف. قدرت تفکیک ۱۳
- ب. بازده ۱۳
- ۷-۱ کاربردهای جاری فعالسازی نوترونی ۱۴
- ۱-۷-۱ کاربردهای فعالسازی نوترونی با استفاده از راکتورهای تحقیقاتی در برخی از کشورها ۱۴
- ۸-۱ کاربردهای ویژه NAA ۱۵
- ۱-۸-۱ بررسی وجود عناصر مختلف در خون و اثر آن در متابولیسم بدن ۱۵
- ۲-۸-۱ کاربرد در کشاورزی و مواد غذایی ۱۶

فصل دوم: آزمایش و داده‌برداری

- ۱-۲ مقدمه ۱۸
- ۲-۲ چشمه نوترون ۱۹
- ۳-۲ آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) ۲۰

- ۲۰ بازده آشکارسازهای ۱-۳-۲
- ۲۱ تحلیل طیف انرژی آشکارساز سوسوزن ۲-۳-۲
- ۲۲ الف. اثر فوتوالکتریک ۲۲
- ۲۲ ب. پراکندگی یا اثر کامپتون ۲۲
- ۲۲ ج: تولید زوج ۲۲
- ۲۳ ۴-۲ طیف نگاری پرتوهای گاما ۲۳
- ۲۷ ۵-۲ عناصر مورد استفاده به صورت پولک ۲۷
- ۲۸ ۶-۲ مدار آزمایش ۲۸
- ۳۰ ۷-۲ انجام آزمایش و نتایج مواد مختلف ۳۰
- ۳۰ ۱-۷-۲ آلومینیم ۳۰
- ۳۴ ۲-۷-۲ آرسنیک (As) ۳۴
- ۳۵ ۳-۷-۲ برم (Br) ۳۵
- ۳۶ ۴-۷-۲ مس (Cu) ۳۶
- ۳۸ ۵-۷-۲ ید (I) ۳۸
- ۳۹ ۶-۷-۲ ایندیم (In) ۳۹
- ۴۱ ۷-۷-۲ منگنز (Mn) ۴۱
- ۴۲ ۸-۷-۲ سدیم (Na) ۴۲
- ۴۴ ۹-۷-۲ وانادیم (V) ۴۴

فصل سوم: اقدامات محاسباتی

- ۴۶ ۱-۳ مقدمه ۴۶
- ۴۷ ۲-۳ MCNP ۴۷
- ۴۷ ۳-۳ نحوه استفاده از کد MCNP ۴۷
- ۴۷ ۱-۳-۳ کارت سلول ۴۷
- ۴۸ ۲-۳-۳ کارت سطح ۴۸
- ۴۸ ۳-۳-۳ کارت داده ۴۸
- ۵۲ ۴-۳ شبیه سازی و انجام محاسبات ۵۲

۳-۴-۱ برنامه ورودی MCNP برای محاسبه فعالیت ۵۳

۳-۴-۲ محاسبه تعداد ذرات واپاشیکننده در مقابل آشکارساز ۵۶

۳-۴-۳ محاسبه طیف گاماهاى گسیل شده از پولک ۵۷

۳-۵ نتایج محاسبات روی پولک آلومینیم و مقایسه با مقادیر تجربی ۵۷

منابع ۶۵

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: رده‌بندی نوترونها بر حسب انرژی. ۱۰
- جدول ۲-۱: عناصر استفاده شده در فعالسازی با نوترون. ۲۷
- جدول ۲-۲: نتایج به دست آمده از طیف گامای حاصل از ارسنیک اکتیو شده و زمینه مربوط به آن. ۳۵
- جدول ۲-۳: اطلاعات به دست آمده از طیف گامای حاصل از برومین فعال شده و زمینه مربوط به آن. ۳۵
- جدول ۲-۴: اطلاعات به دست آمده از طیف حاصل از مس اکتیو شده و زمینه مربوط به آن. ۳۸
- جدول ۲-۵: اطلاعات به دست آمده از طیف گامای حاصل از ید فعال شده و زمینه مربوط به آن. ۳۹
- جدول ۲-۶: اطلاعات به دست آمده از طیف ایندیم و زمینه مربوط به آن. ۴۰
- جدول ۲-۷: اطلاعات به دست آمده از طیف گامای منگنز و زمینه مربوط به آن. ۴۱
- جدول ۲-۸: اطلاعات به دست آمده از طیف سدیم و زمینه مربوط به آن. ۴۴
- جدول ۲-۹: اطلاعات به دست آمده از طیف گامای وانادیم و زمینه مربوط به آن. ۴۴
- جدول ۳-۱: کارتهای سطوح در MCNPX. ۴۸
- جدول ۳-۲: تالیهای استاندارد در MCNPX. ۵۱
- جدول ۳-۳: اطلاعات حاصل از فعال سازی پولک آلومینیم با ضخامت ۲ میلی‌متر. ۵۸
- جدول ۳-۴: اطلاعات حاصل از فعال سازی پولک آلومینیم با ضخامت ۳ میلی‌متر. ۵۹

فهرست شکلها

- شکل ۱-۱: طرحواره‌ای از نحوه فعالسازی یک عنصر پایدار ۲
- شکل ۱-۲: وابستگی سطح مقطع میکروسکوپی نوعی به انرژی نوترون ۴
- شکل ۱-۳: رفتار زمانی تعداد اتمهای فعالشده در پولک ۵
- شکل ۲-۱: اجزاء آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) ۲۱
- شکل ۲-۲: نمونه پاسخ یک آشکارساز به پرتوهای گامای تک انرژی ۲۷
- شکل ۲-۳: نحوه اتصال ابزارهای مورد استفاده در آزمایشگاه ۲۸
- شکل ۲-۴: طیف گامای گسیل شده از ^{137}Cs ۲۹
- شکل ۲-۵: طیف گامای گسیلی از ^{60}Co ۲۹
- شکل ۲-۶: برازش خطی انرژی-شماره کانال گاماها گسیل شده از دو چشمه ^{137}Cs و ^{60}Co ۳۰
- شکل ۲-۷: طیف گاما حاصل از ^{28}Al در مدت زمان ۲۲۵ ثانیه ۳۱
- شکل ۲-۸: بازده آشکارساز NaI بر حسب انرژی گاما، برای چند اندازه مختلف ۳۳
- شکل ۲-۹: طیف گاما حاصل از ^{76}As در مدت زمان ۴۵ دقیقه ۳۴
- شکل ۲-۱۰: طیف گاما تأخیری حاصل از ^{64}Cu در مدت زمان ۳۰ دقیقه ۳۷
- شکل ۲-۱۱: طیف گاماها تأخیری گسیل شده از ^{116}In در مدت زمان ۱۰ دقیقه ۴۰
- شکل ۲-۱۲: طیف گاماها تأخیری گسیلی از $^{56}_{25}Mn$ ۴۱
- شکل ۲-۱۳: طیف گاماها تأخیری گسیلی از $^{24}_{11}Na$ ۴۳
- شکل ۲-۱: طیف گاماها تأخیری گسیلی از ^{52}V ۵۲
- شکل ۳-۱: سامانه تعریف شده در برنامه ورودی MCNP شامل سلولهای مختلف ۵۳
- شکل ۳-۲: طیف حاصل از شبیه سازی فعال سازی پولک آلومینیم با ضخامت ۲ میلیمتر ۵۸

فصل اول

کلیات

۱-۱ تحلیل فعال سازی پولک^۱

فعال سازی پولک، که اساس آن تولید یک ایزوتوپ پرتوزا به کمک گیراندازی نوترون است، روشی است توانمند که علاوه بر امکان اندازه گیری شار نوترون یک میدان نوترونی، برای تحلیل فعال سازی نوترونی (NAA)^۲ کاربرد گسترده دارد.

در این فرایند از پولک های کوچکی استفاده می شود که در یک مدت مناسب درون شار نوترون قرار گرفته و سپس با استفاده از یک آشکارساز، گاما های گسیل شده از آن شناسایی و اندازه گیری می شود. اگر این کار با هدف تحلیل فعال سازی نوترونی انجام شود، به ابزار یا اطلاعات زیر نیاز است:

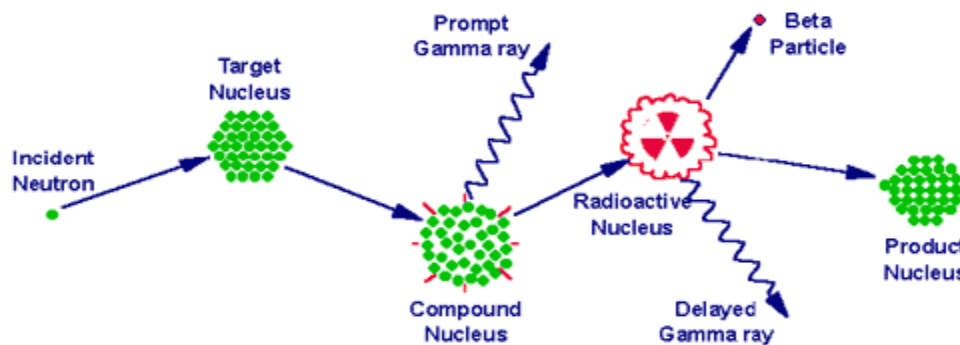
۱. چشمه نوترون
۲. پولک های مناسب
۳. ابزاری برای آشکارسازی پرتوهای گاما
۴. اطلاعات دقیق از واکنش هایی که پس از برهم کنش نوترون ها با هسته های هدف رخ می دهد.

از نقطه نظر میکروسکوپی آنچه را که اتفاق می افتد می توان مطابق شکل ۱-۱ نشان داد.

^۱ Foil Activation

^۲ Neutron Activation Analysis

طبق شکل ۱-۱ نوترون با هسته هدف (نمونه مورد بررسی) برهمکنش نموده و هسته مرکبی را به حالت برانگیخته تشکیل می‌دهد. در بسیاری از موارد، هسته مرکب بلافاصله با گسیل یک یا چند پرتوی گامای آنی، به حالت پایدار می‌رود. اما در مواردی هم هسته باقیمانده پرتوزا بوده و عمدتاً با گسیل بتا و یک یا چند گامای تأخیری مشخص واپاشی می‌کند. آهنگ واپاشی با نیمه‌عمر منحصر به فرد هسته پرتوزا تطبیق دارد.



شکل ۱-۱: طرحواره‌ای از نحوه فعالسازی یک عنصر پایدار [۱]

بر حسب نوع هسته، نیمه عمرها گستره‌ای از کسر ثانیه تا چندین سال را در بر می‌گیرد.

با این توضیح بر حسب زمان اندازه‌گیری، NAA در دو گروه مجزا رده‌بندی می‌شود.

الف. اندازه‌گیری گامای گسیل شده در حین فعال‌سازی، یا تحلیل فعال‌سازی نوترونی با استفاده از

گاماهاى آنی ($PGNAA$)^۱

ب. اندازه‌گیری گامای حاصل از واپاشی پرتوزا، یا تحلیل فعال‌سازی نوترونی با استفاده از گاماهاى

تأخیری ($DGNAA$)^۲

به عنوان مثالی از گاماهاى تأخیری، به فعال‌سازی پولک سدیم اشاره می‌کنیم. اگر ^{23}Na (سدیم طبیعی) را تحت تابش نوترون قرار دهیم، با گیراندازی نوترون به ایزوتوپ ناپایدار ^{24}Na که در حالت برانگیخته نیز هست، تبدیل می‌شود. این رادیو نوکلید پس از گسیل یک پرتوی گامای آنی، با گسیل بتا و دو پرتو گامای عمده با انرژی $1368/53 keV$ و $2754/09 keV$ به عنصر پایدار ^{24}Mg واپاشی می‌کند. در یک سامانه آشکارسازی مناسب، انرژی پرتوهای گاما به تپ‌هایی تبدیل می‌شوند که دامنه آنها متناسب با انرژی پرتوهای گاما است. از جمع‌آوری و شمارش تپ‌ها بر حسب انرژی نموداری به وجود

^۱ Prompt Gamma Neutron Activation Analysis

^۲ Delay Gamma Neutron Activation Analysis

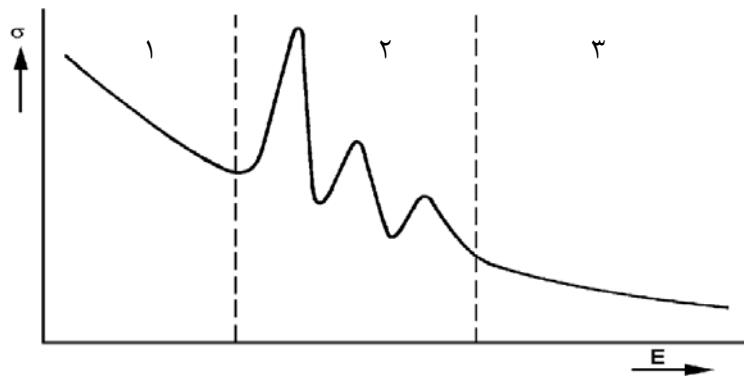
می‌آید که همان طیف ^{24}Na است. در این طیف دو قله اصلی با انرژی‌های ذکر شده مشاهده می‌شود که مساحت زیر دو قله متناسب با تعداد پرتوهای گامای گسیل‌شده از رادیو نوکلید مورد نظر است. در بخش ۱-۵ به مبحث گاما‌های آنی و تأخیری می‌پردازیم. اما آنچه در مورد پولک فعال شده می‌توان گفت این است که با توجه به فعالیت اندازه‌گیری شده پولک توسط آشکارساز و با آگاهی از میزان سطح مقطع گیراندازی نوترون با عنصر پولک، می‌توان اطلاعاتی از شار نوترون بدست آورد. بدیهی است که در این روش برای آشفته نشدن شار نوترون، اندازه پولک باید کوچک باشد. اصولاً فعالسازی پولک برای توصیف شار نوترون در ابزارهای هسته‌ای متفاوت، مانند رآکتورها و چشمه‌های نوترون می‌تواند بسیار مفید باشد.

واکنش‌های نوترون با پولک به دو دسته تقسیم می‌شود^[۲]:

۱- واکنش‌های آستانه‌ای

۲- واکنش‌های غیرآستانه‌ای

واکنش‌های غیرآستانه‌ای با احتمال‌های متفاوتی، بسته به سطح مقطع جذب عنصر پولک، برای کل طیف نوترون‌ها رخ می‌دهد. سطح مقطع این واکنش‌ها نوعاً مشابه شکل ۱-۲ است، که در انرژی‌های پایین (ناحیه ۱) اندازه سطح مقطع نسبت به مقدار آن در انرژی‌های بالا (ناحیه ۳) به مراتب بیشتر است. به همین دلیل بیشتر، نوترون‌های حرارتی مد نظر است. اما واکنش‌های آستانه‌ای فقط با نوترون‌های با انرژی جنبشی بالاتر از انرژی آستانه رخ می‌دهند و در انرژی‌های پایین‌تر از آستانه اساساً واکنشی وجود ندارد و به عبارتی سطح مقطع صفر است. این واکنش‌ها به دلیل اینکه انرژی آستانه نوعاً در حدود MeV است، برای تحلیل طیف نوترون‌های سریع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک طرح موثر برای برخورد نوترون‌های پر انرژی به پولک، پوشاندن آن با لایه‌ای از کادمیوم است. سطح مقطع جذب کادمیوم برای نوترون‌های حرارتی بسیار زیاد، و از انرژی حدود $0.35 eV$ به سرعت شروع به افت می‌کند. در این صورت تقریباً تمام نوترون‌های با انرژی کم‌تر از مقدار فوق (اصطلاحاً به آن قطع کادمیوم می‌گویند) با کادمیوم برهم‌کنش می‌کنند و فقط نوترون‌های با انرژی بیشتر از پوشش کادمیومی عبور کرده و به پولک می‌رسند. این عمل برای احتراز از واکنش‌های در نظر گرفته نشده با نوترون‌های حرارتی است.



شکل ۱-۲: وابستگی سطح مقطع میکروسکوپی نوعی به انرژی نوترون [۲]

۱-۲ اصول فعال سازی پولک [۲]

در مدت زمان بمباران نوترونی پولک واقع در یک میدان نوترونی، اتم‌های هدف (پولک) ممکن است از طریق برهم کنشهای هسته‌ای مختلفی فعال شوند. هر کدام از واکنشها یک محصول خاص دارد، که بسیاری از آنها گسیلنده گاما هم هستند. اگر نیمه عمر این نوع هسته‌های گاما از حد اقل کمی بیش از چند دقیقه باشد، می‌توانیم پولک را از محل تابش نوترون دور کرده و در مقابل آشکارساز قرار دهیم تا انرژی و شدت گامای آن اندازه‌گیری شود. آشکارساز تعداد فوتون‌های گاما در هر انرژی را شمرده و روی خروجی تجزیه-گر چند کاناله یا *MCA* میزان آن را بر حسب انرژی نشان می‌دهد. نمودار بدست آمده، که همان طیف خروجی آشکارساز است، شامل چند قله است که منطبق بر انرژی گامای واپاشی می‌باشد. از اندازه‌گیری سطح زیر این قله‌ها فعالیت پولک محاسبه می‌شود.

رفتار زمانی تعداد اتم‌های فعال شده در پولک برای یک واکنش نوعی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

تعداد هسته‌های فعال شده در پایان زمان تابش t_a به مقدار N' می‌رسد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲].

$$N'(t_a) = \frac{n\sigma\phi}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_a}) \quad 1-1$$

در این رابطه σ سطح مقطع میکروسکوپی برهم کنش، n تعداد اتم‌های هدف، ϕ شار نوترون و λ ثابت واپاشی محصول فعال شده است.

رابطه بالا اینگونه به دست می‌آید که اگر آهنگ تولید هسته‌های پرتوزا را با R نشان دهیم، مسلم است که این کمیت به تعداد هسته‌های هدف (n)، شار نوترون (ϕ) و سطح مقطع گیراندازی نوترون (σ) بستگی دارد، یعنی

$$R = n\sigma\phi \quad 2-1$$

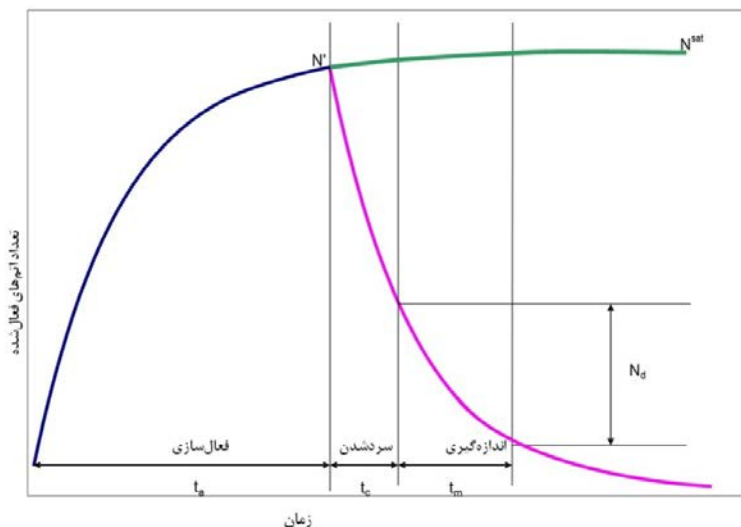
در این صورت آهنگ تغییر تعداد هسته‌های فعال شده برابر است با آهنگ تولید R منهای آهنگ واپاشی. به عبارت دیگر:

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N = n\sigma\phi - \lambda N \quad 3-1$$

با انتگرال گیری از این معادله، در بازه زمانی صفر تا t_a ، رابطه ۱-۱ به دست می‌آید. اگر زمان فعال‌سازی نسبت به نیمه عمر رادیوایزوتوپ حاصل طولانی باشد به گونه‌ای که $\lambda t_a \gg 1$ باشد، در این صورت تعداد اتم‌های فعال شده به مقدار اشباع N^{sat} می‌رسد. در

حالت اشباع تعداد اتم‌های فعال به یک حد پایدار رسیده و $\frac{dN}{dt} = 0$ است. در این صورت:

$$N^{sat} = \frac{n\sigma\phi}{\lambda} \quad 4-1$$



شکل ۱-۳: رفتار زمانی تعداد اتم‌های فعال شده در پولک [۲]

پس از این که پولک را، برای اندازه گیریهای بعدی، از میدان نوترونی خارج می‌کنیم، تولید رادیوایزوتوپ مورد نظر متوقف شده ولی واپاشی ادامه دارد. این حالت را اصطلاحاً سردشدن می‌گویند. در حقیقت از این لحظه فرصت کمی داریم تا پولک را به محل سامانه آشکارسازی برسانیم. در این مدت که در شکل ۱-۳ با t_c نشان داده شده است، تعداد اتم‌های فعال شده طبق قانون ساده نمایی واپاشیده و از N' به N کاهش می‌یابد (فرض شده است تعداد اتم‌های فعال هنوز به اشباع نرسیده است)، به طوری که

$$N = N' e^{-\lambda t_c}$$

زمان واپاشی ناشی از جابه‌جا کردن پولک از مقابل شار نوترون تا محل آشکارساز اهمیت دارد، زیرا منجر به کاهش فعالیت کل موجود در پولک می‌شود. بخصوص اگر نیمه عمر خیلی کوتاه باشد، فعالیت چندانی برای اندازه‌گیری باقی نمی‌ماند و خطای داده‌های تجربی را بالا می‌برد. تعداد اتم‌هایی که از لحظه شروع اندازه‌گیری تا زمان t_m واپاشی می‌کنند برابر است با N_d که از رابطه ۵-۱ بدست می‌آید^[۲].

$$N_d = N' e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m}) \quad 5-1$$

اگر مدت فعالسازی طولانی باشد، در این صورت N^{sat} جایگزین N' شده و خواهیم داشت:

$$N_d = N^{sat} e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m}) \quad 6-1$$

N_d با توجه به مقدار S ، مساحت سطح زیر قله فتوالکتریک طیف گامای جمع‌آوری شده در مدت زمان اندازه‌گیری، G زاویه فضایی آشکارساز و پولک، و ε بازده ذاتی فتوالکتریک آشکارساز در انرژی گامای گسیل شده از پولک، قابل محاسبه می‌باشد. سپس با استفاده از رابطه ۵-۱ مقدار N^{sat} و از آنجا فعالیت پولک در پایان پرتودهی تعیین می‌گردد.

$$A = \lambda N^{sat} = \frac{\lambda N_d}{e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m})} \quad 7-1$$

اگر لازم باشد شار نوترون را محاسبه کنیم، از همین فعالیت بیشینه می‌توان کمک گرفت. با استفاده از رابطه ۴-۱ خواهیم داشت

$$A = \lambda N^{sat} = n \sigma \varphi \quad 8-1$$

که در آن n از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$n = m N_a / M \quad 9-1$$

که در این رابطه، M جرم اتمی هدف، N_a عدد آووگادرو و m جرم نمونه مورد بررسی است. با قرار دادن رابطه ۹-۱ در رابطه ۸-۱، و البته با در نظر گرفتن اینکه α کسری از ایزوتوپ نمونه باشد که در واکنش فعالسازی شرکت می‌کند، خواهیم داشت:

$$A = \frac{m N_a \sigma \varphi}{M} \alpha \quad 10-1$$

$$\varphi = \frac{AM}{\alpha \sigma m N_a} \quad 11-1$$

با جایگزین کردن A از رابطه ۷-۱ نتیجه می‌شود:

$$\varphi = \frac{MN_d}{\alpha \sigma m N_a e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m})} \quad 12-1$$

N_d در فصل ۲ به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نکته: در پدیده فعال‌سازی به کمک ذرات تابشی، عمدتاً از نوترون استفاده می‌شود زیرا نوترون بدون بار بوده و حتی با انرژی‌های کم نیز می‌تواند با هسته‌ها برهم‌کنش کرده و گستره وسیعی از برهمکنش‌های هسته‌ای را القا نماید. به همین دلیل واژه فعال‌سازی عموماً با پسوند نوترونی در فیزیک هسته‌ای ظهور پیدا کرده است. بنابراین در ادامه این فصل به اختصار به معرفی چشمه‌های نوترون می‌پردازیم.

۳-۱ چشمه‌های نوترون

اصولاً نوترون آزاد، به دلیل ناپایداری و نیمه عمر کوتاهش (حدود ۱۲ دقیقه)، در طبیعت وجود ندارد. از طرف دیگر، اگر شکافت خود به خود را به عنوان یک چشمه نوترونی کنار بگذاریم، تقریباً هیچ ایزوتوپ پرتوزائی، به جز تعداد محدودی از پاره‌های شکافت آن هم با عمرهای بسیار کوتاه و غیر قابل دسترس، وجود ندارد که نوترون گسیل کنند. از اینرو برای تأمین نوترون مورد نیاز باید به سراغ روش‌های مصنوعی تولید آن برویم.

با توجه به نکات فوق، می‌توان چشمه‌های نوترون را در یک جمع‌بندی به سه دسته کلی تقسیم کرد که عبارتند از:

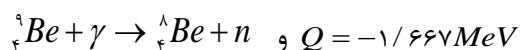
الف. چشمه‌های رادیوایزوتوپی ($\gamma-n$) و ($\alpha-n$) که به صورت ترکیبی از یک رادیو نوکلید و یک عنصر خاص مثل Be و ${}^3\text{He}$ ساخته می‌شود.

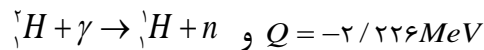
ب. شتابدهنده‌های مولد نوترون که در آن نوترون، طی فرود یک ذره باردار پر انرژی بر هدفی مناسب و انجام یک واکنش هسته‌ای نظیر (d, n) یا (p, n)، آزاد می‌شود.

ج. چشمه‌های شکافت شامل شکافتهای خود به خود، مثل ${}^{252}\text{Cf}$ ، و شکافتهای القائی در برخی هسته‌های سنگین مانند ${}^{235}\text{U}$

الف. چشمه‌های رادیوایزوتوپی

هسته برخی اتم‌های سبک مانند برلیوم $({}^9\text{Be})$ و دوتریم (${}^2\text{H}$) که انرژی بستگی تک نوترون آنها پائین است، می‌توانند با جذب یک پرتو گاما با انرژی مناسب، نوترون منفرد خود را آزاد کنند. واکنش‌های هسته‌ای مربوطه عبارت است از:



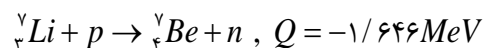


این دو واکنش انرژی گیر قادرند به سادگی با گاماهاى حدود $1/7\text{MeV}$ و بیشتر (برای واکنش اول) و گاماهاى حدود $2/3\text{MeV}$ و بیشتر (برای واکنش دوم) تولید نوترون کنند. به این ترتیب چنانچه یک رادیوایزوتوپ گسیلنده گاما، با حداقل انرژیهای فوق مانند ${}^{134}\text{Sb}$ ، ${}^{88}\text{Y}$ ، ${}^{140}\text{La}$ و ${}^{24}\text{Na}$ که به ترتیب گاماهاى با انرژی $(1/7\text{MeV})$ ، $(1/9, 2/1\text{MeV})$ ، $(2/5\text{MeV})$ و $(2/76\text{MeV})$ گسیل می کنند، در مجاورت برلیوم و یا دوتریم قرار گیرد چشمه نوترون (γ, n) بوجود خواهد آمد.

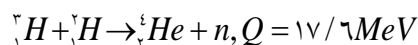
از مهمترین و پرکاربردترین چشمه‌های رادیوایزوتوپی دیگر نوترون، چشمه‌های (α, n) و از جمله چشمه مشهور امرسیم- برلیم $(Am - Be)$ می باشد که به دلیل استفاده از آن در این پروژه در مورد آن در فصل چهارم توضیحاتی خواهیم داد.

ب. چشمه‌های نوترون حاصل از شتابدهنده‌ها

اساس کار تولید نوترون در شتابدهنده‌ها به این صورت است که باریک‌های از ذرات باردار به هدفی مناسب برخورد می کنند و در نتیجه انجام یک واکنش هسته‌ای نوترون تولید می گردد. این واکنشها به گروه‌های کلی (p, n) ، (d, n) و (t, n) تقسیم‌بندی می شوند. مهمترین ویژگی چشمه‌های شتابدهنده، در مقایسه با سایر چشمه‌ها، عبارت است از: شدت قابل حصول نوترون به میزان چند برابر چشمه‌های رادیوایزوتوپی، تولید نوترون با انرژی بسیار بالا، امکان تهیه چشمه‌های تپی و تولید نوترون‌های تک‌انرژی. انرژی نوترون حاصل از این چشمه‌ها بر اساس قواعد پایستگی انرژی و تکانه خطی، برای یک برهمکنش خاص، فقط به انرژی ذره فرودی و زاویه گسیل (نسبت به راستای ذره فرودی) بستگی دارد. برای مثال در واکنش (p, n) زیر، که انرژی آستانه آن $1/881\text{MeV}$ است، انرژی نوترونهای گسیل شده تحت زاویه $\theta = 4^\circ$ بازای $E = 25\text{MeV}$ برابر است با $23/265\text{MeV}$ ^[5]



واکنش رایج دیگری که برای این نوع چشمه‌های نوترونی به کار می‌رود، واکنش انرژی‌زای زیر است که به واکنش $(D - T)$ مشهور می‌باشد.



با این واکنش می‌توان به چشمه نوترونی با شدت نسبتاً بالا، تا حدود $10^{11} n/s$ و انرژی نسبتاً دلخواه دست یافت.

ج. چشمه نوترونی شکافت

■ **شکافت خود به خود.** بعضی از هسته‌های سنگین خود به خود دستخوش شکافت می‌شوند. از آنجا که در هر شکافت همواره تعدادی نوترون نیز تولید می‌شود، اینگونه هسته‌ها می‌توانند به عنوان چشمه نوترون مورد استفاده قرار گیرند. در حال حاضر اصلی‌ترین چشمه نوترون حاصل از شکافت خود به خود، کالیفرنیوم ۲۵۲ (^{252}Cf) است که از هر میکروگرم آن $2/3 \times 10^6$ نوترون در ثانیه (یا از هر یک کوری آن $4/3 \times 10^9$ نوترون در ثانیه) در فضای 4π گسیل می‌گردد. البته مد اصلی واپاشی ^{252}Cf آلفازایی است که بیش از ۹۷٪ واپاشیهای آن را شامل می‌شود اما حدود ۳٪ شکافت خود به خود، همانطور که می‌بینیم، شار بالایی از نوترون را ارائه می‌دهد. نیمه‌عمر مؤثر این رادیوایزوتوپ، با توجه به دو مد واپاشی شکافت خودبه‌خود و گسیل آلفا، ۲/۶۵ سال است^[۱۱].

ویژگی ممتاز این نوع چشمه‌ها حجم بسیار کوچکی (در حد میلی‌گرم و یا میکروگرم)، در قبال نوترون‌دهی بالای آنها است که بطور طبیعی حمل و نقل و کار با آنها را بسیار ساده می‌کند.

■ **شکافت القائی (چشمه‌های رآکتوری).** رآکتورهای هسته‌ای دستگاه‌های بزرگی هستند که در آنها هسته‌های شکافت پذیر نظیر ^{235}U به دو پاره‌هسته سبکتر شکافته شده و بطور همزمان تعدادی نوترون نیز گسیل می‌گردد. میزان نوترون‌های تولید شده در حدی است که رآکتورها را می‌توان از پرقدرت‌ترین و سرشارترین چشمه‌های نوترون به حساب آورد. برای مثال، در یک رآکتوری تحقیقاتی با توان ۵ مگاوات، در هر ثانیه حدود 10^{15} نوترون تولید می‌شود که چشمه بالقوه پرقدرتی است. گستره انرژی نوترون‌های حاصل از این شکافت، همانند شکافت خودبه‌خود، خیلی وسیع است

اشکال اساسی راکتورها، نسبت به سایر چشمه‌های نوترون، حجم بسیار بزرگ و کم در دسترس بودن آنهاست. علاوه بر این آلودگی شدید محیط اطراف آن، از نظر سطح بالای تابش‌های هسته‌ای، کاربری آن را برای برخی از تحقیقات، از جمله تحقیقات مربوط به فعال‌سازی نوترونی، محدود می‌کند.

۴-۱ رده‌بندی نوترون‌ها

از آنجا که نوع برهمکنشی که نوترون می‌تواند با هسته انجام دهد به شدت به انرژی آن بستگی دارد، نوترون‌ها را بر حسب انرژی‌شان رده‌بندی می‌کنند. این تقسیم‌بندی، بسته به نوع کاربرد و هدفی که دنبال می‌شود، به گونه‌های متفاوت در مراجع آمده است. یک رده‌بندی نه چندان ریز برحسب مقدار و یا بازه انرژی در جدول ۱-۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱-۱: رده‌بندی نوترون‌ها بر حسب انرژی

نام	انرژی
نوترون‌های فوق سرد	$5 \times 10^{-5} eV$ تا $3 \times 10^{-7} eV$
نوترون‌های سرد	$0.025 eV$ تا $5 \times 10^{-5} eV$
نوترون‌های حرارتی	$\approx 0.025 eV$
نوترون‌های کند	$\approx 1 eV$
نوترون‌های فوق حرارتی (تشدید)	$0.15 eV$ تا $100 keV$
نوترون‌های سریع	$100 keV$ تا $1 MeV$
نوترون‌های فوق سریع	$1 MeV$ تا $20 MeV$
نوترون‌های نسبیتی	$> 20 MeV$

گاهی در یک تقسیم‌بندی کلی، نوترون‌ها را فقط به دو گروه سریع و حرارتی تقسیم می‌کنند. انرژی نوترون‌های سریع در این تقسیم‌بندی بیشتر از حدود $0.1 MeV$ و نوترون‌های حرارتی را با انرژی حوالی $0.025 eV$ در نظر می‌گیرند. اطلاق نام حرارتی به اینگونه نوترون‌ها از آنجا ناشی می‌شود که اگر نوترون‌های پراورزی در یک محیط مادی پراکنده باشند، طی برخوردهای متعدد و پی‌درپی با اتم‌ها و مولکول‌های محیط، با از دست دادن انرژی به وضعیتی می‌رسند که میانگین انرژی‌شان با میانگین انرژی گرمائی اتم‌های اطراف هم‌ارز می‌گردد.

در چنین شرایطی، احتمال دریافت انرژی در برخوردهای بعدی با احتمال از دست دادن آن یکسان است، و گویی به تعادل دمائی با محیط رسیده‌اند.

در بازه نوترون‌های فوق حرارتی و پایینتر از آن، عمدتاً واکنش‌های گیراندازی (n, γ) در هسته‌های هدف رخ می‌دهند.

اگر در NAA نوترون‌های فوق حرارتی واکنش‌های (n, γ) را به وجود آورده باشند، فرایند را تحلیل فعال سازی نوترون فوق حرارتی ($ENAA$)^۱ گویند. در اجرای این روش، نمونه مورد نظر را در لایه‌هایی از بور یا کادمیوم پوشانده و تحت بمباران نوترون‌های کم انرژی قرار می‌دهند.

^۱ Epithermal Neutron Activation Analysis