

رسالة محمد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای
پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

استفاده از روش آنالیز فعال‌سازی نوترونی به منظور آنالیز عنصری نمونه‌ی سرامیک به روش عددی

نگارنده:

فریبا زاهدی

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا شجاعی

استاد مشاور:

بهنام آزادگان

شهریور ۱۳۹۷

سپاسگزاری

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا بتوانم تحقیق خود را به پایان برسانم و بتوانم سهمی هرچند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم که چو ایران نباشد، تن من مباد.

تقدیم به پدر و مادرم؛

فداکارانی که در سایه درخت پر بار وجودشان آسودم و از ریشه آنها شاخ و برگ گرفتم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش قدم برداشتم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی بودند و انسان بودن را معنا کردند.

تقدیم به خواهر و برادر مهربان و عزیزتر از جانم که همواره بزرگ‌ترین حامی و مشوق من در زندگی هستند.

تشکر و قدردانی

در این راه خود را مدیون اساتید بزرگواری می دانم که علم و اخلاق را به من آموختند. بر خود لازم می دانم از استاد با کمالات و شایسته، جناب آقای دکتر محمدرضا شجاعی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از از هیچ گونه کمک علمی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، جناب آقای دکتر بهنام آزادگان به دلیل یاری های بی چشمداشتشان که مشاوره این رساله را پذیرفتند و بسیاری از سختی ها را برایم آسان تر نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

در خاتمه و به رسم ادب و قدرشناسی بر خود لازم می دانم از خانم هدی علویان، آقایان محمد نامی نظری، مصطفی ولی نژاد و علی رضا سعادت که در طول انجام این پروژه با راهنمایی های مفید و مساعدت هایشان مسیر راه را هموار نموده، سپاس گزاری نموده و صحت و سلامت و موفقیت روزافزون این عزیزان را از درگاه باریتعالی آرزومندم.

تعهد نامه

اینجانب فریبا زاهدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک، گرایش هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه استفاده از روش آنالیز فعال‌سازی نوترونی به منظور آنالیز عنصری نمونه‌ی سرامیک به روش عددی تحت راهنمایی آقای دکتر محمدرضا شجاعی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

تحلیل گامای آنی حاصل از فعال‌سازی نوترونی PGNAA، یکی از حساس‌ترین روش‌های تحلیلی هسته‌ای برای تعیین کیفی و کمی عناصر موجود در یک نمونه بر اساس تبدیل هسته‌ای اتمی پایدار به هسته‌ی پرتوزا به‌وسیله‌ی پرتودهی آن با نوترون و اندازه‌گیری تابش مشخصه‌ی گسیل شده از هسته‌ی پرتوزا می‌باشد که به‌دلیل دقت و حساسیت بالای آن و همچنین غیرمخرب بودن این روش، کاربرد و استفاده از آن روز به روز در حال افزایش است. بر این اساس در این پایان‌نامه تلاش شده است که با استفاده از این روش به تحلیل عنصری سه نمونه‌ی سرامیکی Si_3N_4 ، B_4C و ZrO_2 بپردازیم که به‌دلیل خواص متنوع، کاربرد فراوانی در صنایع مهندسی دارند. در ابتدا با استفاده از کد محاسباتی مونت کارلو، هندسه مساله را شبیه‌سازی کردیم. بدین‌منظور از دو چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و چشمه‌ی شکافت خودبه‌خودی ^{252}Cf استفاده کردیم. برای آشکارسازی پرتوهای گامای حاصل از نمونه‌ها هم، آشکارساز HPGe را به‌کار برده‌ایم. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با مقادیر گامای مشخصه‌ی هر ایزوتوپ مقایسه شدند که تا حد قابل قبولی سازگاری وجود داشته‌است که نشان دهنده‌ی کارآمد بودن این روش در آنالیز عنصری نمونه‌های مختلف می‌باشد.

کلید واژگان: آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای آنی، آشکارسازی پرتوی گاما، چشمه‌ی نوترونی

فصل اول: مقدمه و مطالعات پیشین.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۱-۲ تاریخچه‌ی آنالیز فعال سازی نوترونی.....	۲
۱-۳ اصول کلی.....	۳
۱-۳-۱ انتخاب واکنش هسته‌ای بهینه.....	۴
۱-۳-۲ آماده سازی نمونه برای پرتودهی.....	۵
۱-۳-۳ پرتودهی نمونه.....	۵
۱-۳-۴ شمارش نمونه.....	۶
۱-۳-۵ تحلیل نتیجه‌های شمارش.....	۶
۱-۴ حساسیت‌ها در NAA.....	۶
۱-۵ انواع روش‌های آنالیز فعال سازی نوترونی.....	۷
۱-۵-۱ از لحاظ نوع نوترون‌های بمباران کننده.....	۷
۱-۵-۲ از لحاظ امکانات و وسایل آنالیز.....	۸
۱-۵-۳ براساس زمان بندی.....	۸
۱-۶ معایب و مزایا.....	۹
۱-۶-۱ مزیت‌های NAA.....	۹
۱-۶-۲ معایب NAA.....	۱۰
۱-۷ کاربردهای آنالیز فعال سازی نوترونی.....	۱۱
۱-۸ مروری بر کارهای انجام شده.....	۱۲
۱-۹ هدف و بیان مسئله.....	۲۰
۱-۱۰ نوآوری.....	۲۰

۱۱-۱	ساختار و فصل بندی پایان نامه.....	۲۱
فصل دوم: آنالیز فعال سازی نوترونی گامای آنی..... ۲۳		
۱-۲	مقدمه ای بر آنالیز فعال سازی نوترونی گامای آنی.....	۲۴
۲-۲	امکانات لازم برای سیستم PGNAA.....	۲۵
۱-۲-۲	چشمه های نوترونی.....	۲۵
۱-۱-۲-۲	راکتورهای هسته ای.....	۲۶
۲-۱-۲-۲	شتاب دهنده های یون و الکترون شامل مولدهای نوترونی.....	۲۶
۳-۱-۲-۲	چشمه های رادیوایزوتوپی نوترونی.....	۲۷
۲-۲-۲	برهم کنش نوترون با ماده.....	۲۹
۳-۲-۲	انواع برهم کنش های نوترون.....	۲۹
۱-۳-۲-۲	پراکندگی.....	۲۹
۲-۳-۲-۲	جذب.....	۳۰
۴-۲-۲	طیف سنجی پرتوی گاما.....	۳۰
۳-۲	مقدمه.....	۳۰
۱-۳-۲	برهم کنش تابش با ماده.....	۳۰
۲-۳-۲	اندرکنش های فوتون.....	۳۱
۱-۲-۳-۲	اثر فوتوالکتریک.....	۳۲
۲-۲-۳-۲	پراکندگی کامپتون.....	۳۵
۳-۲-۳-۲	پدیده تولید زوج.....	۳۶
۳-۳-۲	جذب و تضعیف فوتون.....	۳۸
۴-۳-۲	ذخیره ای انرژی فوتون با.....	۳۹
۱-۴-۳-۲	انرژی $E < 1.022 \text{ MeV}$	۳۹
۲-۴-۳-۲	انرژی $E \geq 1.022 \text{ MeV}$	۳۹
۵-۳-۲	آشکار سازی.....	۴۰
۱-۵-۳-۲	تفسیر طیف خروجی از فرایند آشکار سازی.....	۴۱

۴۲	..... آشکارسازها. ۶-۳-۲
۴۳	..... آشکارسازهای گازی ۱-۶-۳-۲
۴۳	..... آشکارسازهای سوسوزن. ۱-۶-۳-۲
۴۴	..... آشکارساز های نیمرسانا. ۲-۶-۳-۲
۴۷	فصل سوم: مواد و روش‌ها.....
۴۸	..... کد MCNP ۱-۳
۴۹	..... نمونه‌ها. ۱-۱-۳
۵۱	..... چشمه‌های نوترونی. ۲-۱-۳
۵۶	..... آشکارسازها. ۳-۱-۳
۵۹	فصل چهار: نتایج و بحث.....
۶۰	..... مقدمه. ۱-۴
۶۰	..... تحلیل نتایج. ۲-۴
۶۶	..... مقایسه‌ی مقادیر تجربی و محاسباتی. ۳-۴
۶۹	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
۷۰	..... نتیجه‌گیری. ۱-۵
۷۰	..... پیشنهادها. ۲-۵
۷۱	منابع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: طراحی کلی از فرایند آنالیز فعال‌سازی نوترونی..... ۴
- شکل ۱-۲ اثر فوتوالکتریک..... ۳۳
- شکل ۲-۲ رویداد (۱) گسیل پرتو X مشخصه و (۲) گسیل الکترون اوژه..... ۳۴
- شکل ۳-۲ وابستگی سطح مقطع فوتوالکتریک به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده..... ۳۵
- شکل ۴-۲ پدیده کامپتون..... ۳۵
- شکل ۵-۲ وابستگی سطح مقطع کامپتون به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده..... ۳۶
- شکل ۶-۲ پدیده کامپتون..... ۳۷
- شکل ۷-۲ وابستگی سطح مقطع تولید زوج به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده..... ۳۸
- شکل ۸-۲ تضعیف باریکه گاما در عبور از ماده..... ۳۸
- شکل ۹-۲ طیف اشعه گامای تک انرژی. (a) فوتون ناشی از واپاشی یک هسته‌ی آزاد. (b) فوتون ناشی از برهم‌کنش در محیط مادی. (c) فوتون ناشی از برهم‌کنش در آشکارساز..... ۴۱
- شکل ۱۰-۲ بخش‌های مختلف طیف پرتو گامای نوعی تک انرژی..... ۴۱
- شکل ۱-۳: طراحی سه بعدی از هندسه‌ی کلی مساله..... ۴۹
- شکل ۲-۳: طراحی دو بعدی از هندسه‌ی کلی مساله..... ۴۹
- شکل ۳-۳: هندسه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی چشمه‌ی ^{252}Cf ۵۲
- شکل ۴-۳: طرح کلی چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ و هندسه‌ی شبیه‌سازی شده..... ۵۵
- شکل ۵-۳: طرح کلی هندسه‌ی شبیه‌سازی شده با چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ ۵۵
- شکل ۶-۳: طرح حفاظ آشکارساز با استفاده از اسیدبوریک و سرب..... ۵۶
- شکل ۷-۳: طرح کلی آشکارساز HPGe و هندسه‌ی شبیه‌سازی شده..... ۵۷
- شکل ۱-۴: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله‌ی چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ، با استفاده از آشکارساز HPGe..... ۶۱
- شکل ۲-۴: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله‌ی چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf ، با استفاده از آشکارساز HPGe..... ۶۲
- شکل ۳-۴: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله‌ی چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ، با استفاده از آشکارساز HPGe..... ۶۳
- شکل ۴-۴: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله‌ی چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf ، با استفاده از آشکارساز HPGe..... ۶۴

شکل ۴-۵: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله ی چشمه ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ، با استفاده

از آشکارساز HPGe..... ۶۵

شکل ۴-۶: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله ی چشمه ی نوترونی ^{252}Cf ، با استفاده از

آشکارساز HPGe..... ۶۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: ترکیبات و درصد وزنی زیرکونیوم اکسید $\{ \text{ZrO}_2 (\rho = 6.04 \text{ gr/cm}^3) \}$ ۵۱
- جدول ۲-۳: ترکیبات و درصد وزنی زیرکونیوم اکسید $\{ \text{B}_4\text{C} (\rho = 2.52 \text{ gr/cm}^3) \}$ ۵۱
- جدول ۳-۳: ترکیبات و درصد وزنی زیرکونیوم اکسید $\{ \text{Si}_3\text{N}_4 (\rho = 3.31 \text{ gr/cm}^3) \}$ ۵۱
- جدول ۱-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی سیلیسیم نیتريد با استفاده از چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ۶۶
- جدول ۲-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی سیلیسیم نیتريد با استفاده از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf ۶۷
- جدول ۳-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی کاربرد بور با استفاده از چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf ۶۷
- جدول ۴-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی زیرکونیوم اکسید با استفاده از چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ۶۷
- جدول ۵-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی زیرکونیوم اکسید با استفاده از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf ۶۸

فهرست علائم

نماد	توضیح	واحد
Q	انرژی واکنش	MeV
α	آلفا	-
γ	گاما	-
n	نوترون	-
p	پروتون	-
T_{eff}	نیمه عمر مؤثر	S,min,y
T_{α}	نیمه عمر واپاشی آلفا	S,min,y
T_{sf}	نیمه عمر شکافت خود به خودی	S,min,y
T_e	انرژی جنبشی الکترون	MeV
T_A	انرژی جنبشی اتم پس زده	MeV
BE	انرژی بستگی الکترون	MeV
h	ثابت پلانک	eV.s
ν	بسامد	Hz
τ	سطح مقطع فوتوالکتریک	Barn
E_{γ}	انرژی فوتون قبل از برخورد	MeV
E'_{γ}	انرژی فوتون بعد از برخورد	MeV
E_e	انرژی الکترون قبل از برخورد	MeV
E'_e	انرژی الکترون بعد از برخورد	MeV
P_{γ}	تکانه‌ی فوتون قبل از برخورد	MeV/c
P'_{γ}	تکانه‌ی فوتون بعد از برخورد	MeV/c
P_e	تکانه‌ی الکترون قبل از برخورد	MeV/c
P'_e	تکانه‌ی الکترون بعد از برخورد	MeV/c
E_0	انرژی سکون	MeV
λ	طول موج فوتون فرودی	nm
λ'	طول موج فوتون پراکنده	nm
m_0	جرم سکون	MeV/c ²
c	سرعت نور	m/c
θ	زاویه‌ی پراکندگی	deg
T_+	انرژی جنبشی پوزیترون	MeV
T_-	انرژی جنبشی الکترون	MeV

I_0	شدت پرتوهای ورودی	ذره /s
I_d	شدت پرتوهای خروجی	ذره /s
κ	سطح مقطع تولید زوج	Barn

فصل اول:

مقدمه و مطالعات پیشین

۱-۱ مقدمه

امروزه، در بسیاری از حوزه‌های مطالعاتی و صنعتی، نیاز به دانستن عناصر تشکیل دهنده‌ی مواد به منظور شناخت خواص آن احساس می‌شود. روش‌های متنوعی برای آنالیز مواد وجود دارند که از انواع پرکاربرد آن می‌توان به طیف نگاری فلئورسانس اشعه‌ی ایکس^۱ (XRF) و پراش اشعه‌ی ایکس^۲ (XRD) اشاره کرد که برای تشخیص عناصر موجود در یک نمونه به کار می‌روند. عناصر سنگین با استفاده از این روش‌ها قابل آشکارسازی هستند، اما شناسایی و تحلیل عناصر سبک با استفاده از روش‌های اتمی به دلیل ضعف بودن انرژی لایه‌های ایکس روش مناسبی نیست و انرژی آن‌ها ضعیف بوده و به صورت محلی جذب می‌گردند. همچنین این تکنیک‌های غیر هسته‌ای می‌تواند تا حدودی مخرب باشند. بنابراین، به منظور بهبود دقت در شناسایی عناصر سبک، روش‌های هسته‌ای مانند آنالیز فعال‌سازی نوترونی^۳ (NAA) به دلیل انرژی قابل آشکارسازی پرتوی گاما معرفی شده و مورد استقبال قرار گرفتند [۱-۳].

۲-۱ تاریخچه‌ی آنالیز فعال‌سازی نوترونی

نوترون به‌عنوان عضو بدون بار جفت نوکلئونی، در مطالعه‌ی نیروهای هسته‌ای نقشی اساسی دارد. نوترون‌های حتی با انرژی کم (الکترون‌ولت)، بدون آن‌که تحت تاثیر سد کولنی قرار گیرند، می‌توانند به داخل هسته نفوذ کنند و واکنش‌های هسته‌ای را موجب شوند. اولین مشاهده‌ی تجربی نوترون در سال ۱۹۳۰ روی داد. بوته^۴ و بکر^۵ وقتی بریلیم را با ذرات آلفای حاصل از واپاشی پرتوزا بمباران کردند، تابش خیلی نافذ ولی ناپیوننده‌ای به‌دست آوردند که آن را پرتوهای گامای با انرژی بالا شمردند. در سال ۱۹۳۲، چادویک^۶ با تکرار آزمایش‌های بوته و بکر و همچنین آزمایش‌های اضافی، موفق به کشف نوترون شد.

^۱ X-ray fluorescence spectroscopy

^۲ X-ray diffraction

^۳ Neutron Activation Analysis

^۴ Walter Bothe

^۵ Herbert Becker

^۶ James Chadwick

آنالیز فعال‌سازی نوترونی در سال ۱۹۳۶ و تنها چهار سال پس از کشف نوترون هنگامی که هوسی^۱ و لوی^۲ فهمیدند نمونه‌های حاوی عناصر خاکی نادر پس از این که تحت پرتوهای یک چشمه‌ی نوترونی قرار می‌گیرند، به شدت پرتوزا می‌شوند. آن‌ها مقدار دیسپروسیوم^۳ را در یک نمونه‌ی ایتريوم اندازه گرفتند، دیسپروسیوم موجود در نمونه را وقتی با نوترون‌های چشمه‌ی Ra-Be بمباران کردند، پرتوزا شد. با این مشاهده، آن‌ها به سرعت دریافتند استفاده از واکنش‌های هسته‌ای بر روی نمونه‌ها و سپس اندازه‌گیری رادیواکتیویته‌ی آن‌ها می‌تواند شناسایی کیفی و کمی عناصر موجود در نمونه‌ها را تسهیل سازد. با فراهم شدن شارهای نوترون بالا از راکتورهای هسته‌ای، حساسیت این روش به‌طور چشمگیری افزایش یافت و به علت دقت بالای آن، تحلیل به روش فعال‌سازی نوترونی به یک ابزار حیاتی در زمینه‌های مختلف از علوم مهندسی گرفته تا صنعت و اکتشاف معادن، پزشکی، کنترل محیط زیست و جرم‌شناسی تبدیل شده‌است. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجه و سریع در تکنولوژی‌های مربوط به چشمه‌های نوترونی و آشکارسازها همراه با افزایش قدرت سیستم‌های محاسباتی، کاربردهای بسیاری از این روش را امکان‌پذیر ساخته است [۴-۷].

۱-۳ اصول کلی

آنالیز فعال‌سازی نوترونی، یکی از حساس‌ترین روش‌های تحلیلی برای تعیین کیفی و کمی عناصر موجود در یک نمونه بر اساس تبدیل هسته‌ی اتمی پایدار به هسته‌ی پرتوزا به‌وسیله‌ی پرتوهای آن با نوترون و اندازه‌گیری تابش مشخصه‌ی گسیل شده از هسته‌ی پرتوزا می‌باشد. اساس کار به این شکل می‌باشد که ابتدا نمونه توسط نوترون بمباران می‌شود.

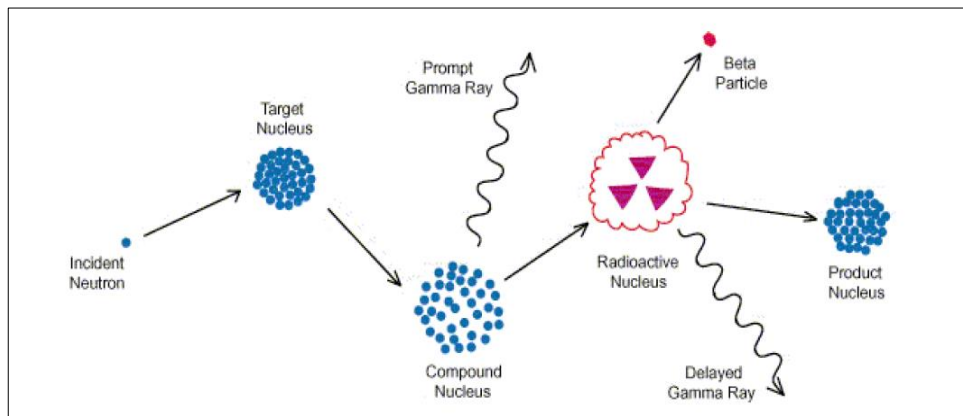
چون نوترون بدون بار است، فقط از طریق نیروهای هسته‌ای با هسته‌ی هدف برهم‌کنش می‌کند. یکی از معمول‌ترین واکنش‌هایی که می‌تواند رخ دهد، واکنش گیراندازی نوترون (n, γ) می‌باشد. نوترون از

^۱ George de Hevesy

^۲ Hilde Levi

^۳ Dysprosium

طریق پراکندگی ناکشسان با هسته‌ی هدف برهم‌کنش می‌کند و یک هسته‌ی مرکب در حالت برانگیخته شکل می‌گیرد. انرژی برانگیختگی هسته‌ی مرکب، نتیجه‌ی انرژی بستگی نوترون به هسته است. هسته‌ی مرکب بلافاصله با گسیل یک یا چند گامای مشخص و انگیزته شده و به حالت پایدار برمی‌گردد. اما در بسیاری از موارد، این فرایند با گسیل پرتوی گامای تاخیری مشخص اما با شدت بسیار کمتر که مقدار آن به نیمه عمر هسته‌ی فعال بستگی دارد، انجام می‌شود [۹-۴،۶].



شکل ۱-۱: طرحی کلی از فرایند آنالیز فعال‌سازی نوترونی [۳۲]

تحلیل به روش فعال‌سازی نوترونی دربرگیرنده‌ی گام‌های اساسی زیر است:

- انتخاب واکنش هسته‌ای بهینه
- آماده‌سازی نمونه برای پرتودهی
- پرتودهی نمونه
- شمارش نمونه
- تحلیل نتیجه‌های شمارش

۱-۳-۱ انتخاب واکنش هسته‌ای بهینه

واکنش هسته‌ای بهینه با در نظر داشتن نکات زیر انتخاب می‌شود:

- تولید فعالیت زیاد باید در مدت زمان مناسبی انجام گردد.
- رادیوایزوتوپ تولید شده باید نیمه عمر مناسبی داشته باشد ($T >$ دقیقه).

- نوع و انرژی تابشی که از رادیوایزوتوپ گسیل می شود نباید مشکلات زیادی برای شمارش ایجاد کند.

- تعداد واکنش‌های ناخواسته باید کمینه شود.

۱-۳-۲ آماده‌سازی نمونه برای پرتودهی

نمونه باید به روش درستی تهیه و پیش از پرتودهی در یک محفظه قراردادده شود. تماس با دست ممکن منجر به انتقال مقدار کافی نمک شده و باعث شود که نمونه‌ی پرتو دیده حضور کلر یا سدیم را نشان دهد. برای پیشگیری از آلودگی، نمونه را باید در جعبه‌های خشک نگهداری کرد و در اتاق تمیز قرار داد. همچنین شخصی که نمونه را تهیه می‌کند باید از ابزار تمیز و دست‌کش‌های پلاستیکی استفاده کند. وزن نمونه‌های جامد باید پس از تمیزشدن تعیین شود و از آنجایی که نمونه‌های مایع و پودر را نمی‌توان تمیز کرد، می‌بایست از ظرف‌های تمیز جهت جلوگیری از ورود آلودگی از طریق دیواره استفاده کرد. بسته بندی ظرف باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- در مقابل گرما و تابش دارای مقاومت زیادی باشد؛ یعنی در محیط پرتودهی ذوب، تجزیه و یا تبخیر نشود.

- دارای مقدار کمی از عناصری باشد که پرتوزا می‌شوند.

- ارزان و کارکردن با آن هم ساده باشد.

۱-۳-۳ پرتودهی نمونه

بسته به نوع واکنش انتخاب شده، پرتودهی نمونه را می‌توان در یک راکتور، یک شتاب دهنده یا با یک چشمه‌ی رادیوایزوتوپی انجام داد. پس از انتخاب وسیله‌ی پرتودهی، گام بعدی انتخاب طول زمان مناسب پرتودهی است. اگر نمونه حاوی ایزوتوپ‌های شناخته شده‌ای با مقادیر معین باشد، به آسانی می‌توان زمان مناسب پرتودهی را برآورد کرد. از طرف دیگر، اگر نمونه کاملاً ناشناخته باشد، آن را برای زمان دلخواهی پرتودهی می‌کنند و برخی از ایزوتوپ‌های موجود در آن را کنترل می‌کنند،

سپس نمونه را دوباره برای زمانی که فعالیت کافی برای تشخیص دقیق هویت ایزوتوپ را تامین کند، پرتو می‌دهند.

۴-۳-۱ شمارش نمونه

پس از اینکه پرتو دهی نمونه کامل شد، تابش‌های ساطع شده از نمونه را با آشکارساز مناسبی می‌شمارند. تعیین کیفی و کمی یک ایزوتوپ، برپایه‌ی تحلیل طیف انرژی تابش‌های گسیل‌شده از رادیوایزوتوپ موردنظر است. همچنین گاهی به‌کارگیری اطلاعات مربوط به نیمه عمر ایزوتوپ‌ها ضروری است. در چنین مواردی به ناچار باید شمارش نمونه در فواصل زمانی معینی تکرار شود.

۵-۳-۱ تحلیل نتیجه‌های شمارش

یک دستگاه ساده‌ی تحلیل فعالیت متشکل از آشکارساز، ابزار الکترونیکی مانند پیش تقویت‌کننده و تقویت‌کننده و تحلیل‌گر چندکاناله^۱ (MCA) است. تحلیل طیف یا در خود MCA انجام می‌شود و یا با یک کامپیوتر رقمی. تحلیل به روش فعال‌سازی، ممکن است کیفی یا کمی باشد. در یک اندازه‌گیری کیفی، فقط شناسایی عنصر مطرح است. از طرف دیگر در یک اندازه‌گیری کمی، علاوه بر شناسایی، مقدار عنصر موردنظر نیز در نمونه تعیین می‌شود [۶].

۴-۱ حساسیت‌ها در NAA

حساسیت‌ها برای NAA، به موارد زیر بستگی دارند:

- پارامترهای تابش مانند شارنوترون، زمان پرتو دهی و واپاشی.
- شرایط اندازه‌گیری مانند زمان اندازه‌گیری و بازده آشکارساز.
- پارامترهای هسته‌ای اندازه‌گیری شده‌ی عناصر شامل فراوانی ایزوتوپ، سطح مقطع نوترون، نیمه عمر و درصد فراوانی پرتوی گاما [۷].

^۱ Multichannel Analyzer

۱-۵ انواع روش‌های آنالیز فعال‌سازی نوترونی

تقسیم‌بندی‌های متنوعی وجود دارد که تنها به معرفی چند مورد آن می‌پردازیم.

۱-۵-۱ از لحاظ نوع نوترون‌های بمباران‌کننده

تقسیم‌بندی NAA در این روش بر مبنای انرژی نوترون‌های بمباران‌کننده است که شامل موارد زیر می‌باشد:

- آنالیز فعال‌سازی با نوترون گرمایی^۱ (TNAA)

رایج‌ترین نوع NAA می‌باشد که در آن از نوترون‌های حرارتی استفاده می‌شود. طیف نوترون‌های حرارتی در دمای اتاق با انرژی ۰/۰۲۵ الکترون‌ولت، بر اساس توزیع ماکسول-بولتزمن توصیف می‌شود که حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد شار نوترون‌های یک راکتور را این نوترون‌ها تشکیل می‌دهند.

- آنالیز فعال‌سازی با نوترون فوق گرمایی^۲ (ENAA)

نوترون‌هایی با انرژی بین ۰/۵ الکترون‌ولت تا ۰/۵ مگا الکترون‌ولت در این دسته قرار می‌گیرند. این نوترون‌ها دارای انرژی متوسطی هستند و به‌طور معمول در یک راکتور، در حدود ۲ درصد کل شار نوترون‌ها را شامل می‌شوند.

- آنالیز فعال‌سازی با نوترون تند^۳ (FNAA)

این دسته از نوترون‌ها دارای انرژی بیش از ۰/۵ مگا الکترون‌ولت می‌باشند. متوسط انرژی نوترون‌های تند، ۲ مگا الکترون‌ولت است. نوترون‌های تند در واکنش‌های (n,γ) به ندرت شرکت می‌کنند اما در واکنش‌هایی که در آن‌ها یک ذره‌ی گسیل می‌شود، مانند (n,p) ، (n,n) یا $(n,2n)$ به‌خوبی حضور دارند [۷].

^۱ Thermal Neutron Activation Analysis

^۲ Epithermal Neutron Activation Analysis

^۳ Fast Neutron Activation Analysis

۱-۵-۲ از لحاظ امکانات و وسایل آنالیز

در دسته‌بندی مرسوم دیگری، آنالیز فعال‌سازی نوترونی را بر اساس نیاز به جداسازی شیمیایی و زمان جداسازی به سه دسته تقسیم می‌کنند.

- آنالیز فعال‌سازی نوترونی دستگاهی^۱ (INAA)

استفاده از نمونه‌برداری اتوماتیک، اندازه‌گیری پرتوهای گاما با آشکارسازهای حالت جامد و فرایند پردازش اطلاعات، اندازه‌گیری همزمان بیش از سی عنصر در انواع نمونه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. در این روش هیچ‌گونه عملیات شیمیایی قبل یا بعد از پرتودهی روی نمونه صورت نمی‌گیرد.

- آنالیز فعال‌سازی نوترونی رادیوشیمیایی^۲ (RNAA)

در بعضی موارد، عناصر مزاحمی در ترکیبات نمونه وجود دارند که در طیف‌نگاری ایجاد مزاحمت می‌کنند. اگر جداسازی شیمیایی به‌منظور حذف تداخلات ناخواسته یا تلغیظ رادیویزوتوپ‌های خاصی بعد از پرتودهی صورت گیرد، تکنیک به‌کار برده آنالیز فعال‌سازی نوترونی رادیوشیمیایی نامیده می‌شود.

- آنالیز فعال‌سازی نوترونی شیمیایی^۳ (CNAA)

جداسازی شیمیایی در این روش قبل از پرتودهی انجام می‌شود.

۱-۵-۳ براساس زمان‌بندی

روش آنالیز فعال‌سازی نوترونی را می‌توان به خاطر حضور دو نوع گامای آبی و تاخیری و زمان اندازه‌گیری این پرتو به دو دسته طبقه‌بندی کرد:

- آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای آبی^۴ (PGNAA)

^۱Instrumental Neutron Activation Analysis

^۲Radiochemical Neutron Activation Analysis

^۳Chemical Neutron Activation Analysis

^۴Prompt Gamma Neutron Activation Analysis

با روش اندازه‌گیری پرتوی گامای آنی در آنالیز از طریق فعال‌سازی نوترونی می‌توان عناصر N, C, B, H ، P, S, Cd, Pb و بعضی از عناصر کمیاب به‌ویژه Gd و Sm را شناسایی کرد. بیشتر این عناصر را نمی‌توان از طریق روش معمولی آنالیز فعال‌سازی با نوترون اندازه‌گیری کرد یا اندازه‌گیری آن‌ها مشکل است [۱۰].

در این روش، پس از جذب نوترون توسط هسته، ایزوتوپ جدیدی با عدد جرمی یک واحد بیشتر به‌وجود می‌آید که به‌شدت برانگیخته است. هسته‌ی برانگیخته به‌طور آنی (در مدت زمانی از مرتبه‌ی 10^{-12} ثانیه) یک پرتوی گاما که خاص آن هسته است، گسیل می‌کند.

- آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای تاخیری^۱ (DGNA)

در اکثر موارد پس از فعال‌سازی نمونه پس از گسیل گامای آنی به حالت پایدار نمی‌رسد و به‌طور هم‌زمان دارای هسته‌های پرتوزا با نیمه عمر کم یا زیاد می‌باشد. این هسته‌ها طی فرآیند واپاشی با گسیل بتا و یک یا چند گامای همراه، که باز هم مشخصه‌ی نوع هسته‌ی پرتوزا است، به حالت پایدار می‌روند. این گاماها تاخیری معمولاً با شدت بسیار کمتر از گاماها‌ی آنی گسیل می‌شوند که میزان آن بستگی به نیمه عمر هسته‌ی فعال دارد [۱۳-۱۱، ۷].

۱-۶ معایب و مزایا

آنالیز فعال‌سازی نوترونی به‌عنوان یک تکنیک هسته‌ای در تعیین غلظت عناصر موجود در یک نمونه، دارای برتری و محدودیت‌هایی می‌باشد. در ادامه به شرح مزایای این روش نسبت به تکنیک‌های دیگر می‌پردازیم.

۱-۶-۱ مزیت‌های NAA

- حساسیت؛ این روش برای اکثر عناصر حساسیت بسیار بالایی دارد و در بعضی از موارد به بزرگی 10^{-10} گرم می‌باشد.

^۱ Delayed Gamma Neutron Activation Analysis

- اثر ماتریس؛ از آنجایی که ماهیت فیزیکی و شیمیایی ماتریس مهم نیست، بنابراین نمونه‌ها و استانداردها نیازی به ترکیب حجمی مشابهی ندارند.
- تحت تاثیر ترکیبات شیمیایی عنصر موردنظر نیست.
- این روش برای شناسایی عناصری که امکان تشخیص آن‌ها با XRF نیست و همچنین عناصری با عدد اتمی پایین (B,H,N,C) و از جمله نمونه‌های جامد، مایع و گاز استفاده می‌شود.
- قابلیت نفوذ بالاتر نوترون و همچنین پرتوهای گاما نسبت به پرتوی ایکس و غیر مخرب بودن.
- آلودگی؛ با توجه به این که تنها عملیات انجام شده بر روی نمونه‌های محیطی اولیه جهت پرتودهی، جمع‌آوری و آماده‌سازی می‌باشد، هیچ واکنش‌گر شاهدهی وجود ندارد و امکان آلوده شدن از واکنش‌های دستگاه به حداقل رسانده شده یا کاملاً حذف گردیده است.
- تکنیک چندعنصری؛ برای بسیاری از کاربردها، این روش یک تکنیک غیرمخرب و چندعنصری است. برای مثال، به اندازه‌ی ۲۸ عنصر در ذرات هوا با استفاده از روش رادیوشیمیایی قابل تعیین و جداسازی هستند.

۱-۶-۲ معایب NAA

- این روش هیچ اطلاعاتی از حالت و ترکیب شیمیایی عناصر به دست آمده نمی‌دهد.
- بازه‌ی زمانی طولانی شمارش ممکن است تعداد نمونه‌هایی را که می‌توانند پردازش شوند، کم کند.
- همه‌ی عناصر نوکلئیدهای رادیواکتیو مناسب ندارند؛ سطح مقطع تشکیل بسیار کوچک یا نیمه عمر بسیار طولانی یا کوتاه دارند، که منجر به حساسیت ضعیف می‌شود.
- در روش NAA برای نمونه‌های محیطی، دوره‌های واپاشی بالاتر از یک ماه برای تعیین تعدادی از هسته‌های با نیمه عمر بالا ضروری است. در نتیجه یک تاخیر زمانی برای برخی از نتایج وجود خواهد داشت.

- بیشتر موسسات آزمایشگاهی دسترسی به راکتور هسته‌ای ندارند.
 - تجهیزات اساسی برای طیف‌سنجی نیمه‌رسانا و امکانات پرتودهی بسیار پرهزینه هستند
- [۱۱، ۶، ۱].

۱-۷ کاربردهای آنالیز فعال‌سازی نوترونی

به طور کلی، تحلیل به روش فعال‌سازی نوترونی روش کارسازی است که در طیف وسیعی از زمینه‌ها کاربرد دارد. در ادامه مروری داریم بر NAA به‌کاربرده شده در تعیین عناصر به‌خصوص رد عناصر در زمینه‌های مختلف که به شرح زیر می‌باشد:

- باستان‌شناسی؛ کهربا، استخوان، سکه‌ها، شیشه‌ها، جواهرات، تابلوهای نقاشی، خاک و سفال، مجسمه‌سازی‌ها و مصنوعات فلزی، مواد کمیاب و ...
 - بیویزشکی؛ اندام‌ها و بافت‌های انسانی، مایعات بدن انسان، مایعات و بافت‌های حیوانات، خون و ترکیبات خون، صفرا، روده، ریه و ...
 - علم محیط‌زیست و زمینه‌های وابسته؛ ذرات اتمسفر، گردوخاک، سوخت‌های فسیلی، گاز دودکش، حیوانات، پرندگان، گیاهان، حشرات، درختان، جلبک‌های دریایی و ...
 - زمین‌شناسی و ژئوشیمی؛ سنگ‌های معدنی، زغال‌سنگ، نفت خام و مواد نفتی، الماس، مرجان-ها، رسوبات، گرد و غبار کیهانی، صخره‌ها، یخچال‌ها و ...
 - مطالعات قانونی؛ بقایای بمب و نارنجک، گلوله‌ی سربی و تفنگ‌های ساچمه‌ای، آشکارسازی مواد منفجره، قطعات شیشه‌ای، مو، رنگ و ...
 - محصولات صنعتی؛ آلیاژها، کاتالیزورها، سرامیک‌ها و مواد نسوز، پلاستیک‌ها، مواد الکترونیکی، محصولات دارویی، سیلیکون‌ها و ...
 - تغذیه؛ رژیم‌های مرکب، غذا، رنگ غذا، غلات، عسل، بذر، سبزیجات، ادویه‌ها، مخمرها و ...
- [۱۴].

۸-۱ مروری بر کارهای انجام شده

قابلیت استفاده از طیف‌نمایی پرتوهای گامای حاصل از گیراندازی نوترون به عنوان تکنیکی برای آنالیز عنصری (PGNAA) در طول زمان تایید شده‌است. اولین اندازه‌گیری‌ها برای به‌کارگیری این پرتوها در نتیجه‌ی گیراندازی توسط آیزنهاور^۱، موریسون^۲، لومبارد^۳ و غیره برای تعیین کمی بور و کادمیوم با استفاده از آنالیز فعال‌سازی نوترون گرمایی در سال‌های ۱۹۶۶ و ۱۹۶۸ به اجرا درآمده بود. پرتوهای با نوترون‌های گرمایی به نمونه‌های زیستی توسط کومار^۴ و همکاران در سال ۱۹۶۹ انجام شده بود. دافی^۵، هنکلمن^۶ و بورن^۷ گزارشی از محدودیت‌های تجربی آشکارسازی برای تعدادی از عناصر را در طول سال‌های ۱۹۷۰، ۱۹۷۱ و ۱۹۷۳ ارائه دادند. در سال‌های ۱۹۷۷ و ۱۹۷۸، گروه‌هایی به سرپرستی نارگلوالا^۸ و سنفتل^۹ به طور جدا تلاش‌هایی در زمینه‌ی کاربرد چشمه‌های ایزوتوپی نوترونی نظیر ²⁵²Cf در اکتشافات زغال‌سنگ و معدن صورت داده‌اند. همچنین در طی دهه‌ی ۷۰ افرادی نظیر گلادنی^{۱۰} و فیلی^{۱۱} آنالیزهای چند عنصری را روی تعدادی از مواد استاندارد مرجع با استفاده از تاسیساتی بر پایه‌ی راکتور، مورد بررسی قرار دادند. اما در طول این سال‌ها همراه با پیشرفت تکنولوژی، علاقه و توجه قابل ملاحظه‌ای در توسعه و کاربرد روش‌های آنالیز به‌وجود آمده‌است [۱۵].

در سال ۱۳۷۹، میری حکیم‌آباد و همکاران کاربرد تحلیل گامای آنی حاصل از فعال‌سازی نوترونی در کشف مواد منفجره‌ی پلاستیکی را مورد مطالعه و تحقیق قرار دادند. مواد منفجره از نظر مقدار ازت

^۱ T.L Isenhour

^۲ G.H Morrison

^۳ S.M Lombard

^۴ D Comar

^۵ D Duffey

^۶ R Henkelmann

^۷ H.J Born

^۸ S.S Nargolwalla

^۹ F.E Senftle

^{۱۰} E.S Gladney

^{۱۱} M.P Failey

بسیار غنی هستند، بنابراین برپایه‌ی روش‌های آشکارسازی هسته‌ای، می‌توان این مواد را با مشخص کردن ترکیباتشان به خصوص ازت، آشکارسازی کرد که با استفاده از پرتوهای گاما با انرژی ۸۳/۱۰ مگا الکترون‌ولت حاصل از جذب نوترون‌های حرارتی قابل شناسایی است. آن‌ها ابتدا این روش را به صورت نظری بررسی کردند، به این صورت که با محاسبات ترابرد توام نوترون و پرتوهای گامای آنی حاصل از برهم‌کنش‌های نوترون به روش مونت-کارلو و استفاده از کد محاسباتی MCNP^۱، طیف پرتوهای گامای آنی را به دست آوردند. سپس با مدل مبتنی بر یافته‌های عددی، کارهای عملی با چشمه‌ی نوترونی مناسب صورت گرفت و برای دو نوع کندکننده‌ی پارافین و گرافیت، میزان توانمندی این روش نقد شد. در نهایت به این نتیجه رسیدند که اگر بتوان اثر زمینه بر طیف انرژی پرتوهای گاما را کاهش داد و آشکارسازها را به نمونه نزدیک‌تر نمود، آن‌گاه کندکننده‌ی گرافیت از پارافین مناسب‌تر خواهد بود [۱۶].

در سال ۲۰۰۰ گاردنر^۲ و همکاران، به بررسی طیف آشکارساز NaI در فعال‌سازی نوترونی برای کاربردهای PGNAA پرداختند. هنگامی که آشکارسازهای NaI در دستگاه‌های آنالیز فعال‌سازی نوترونی مورد استفاده قرار می‌گیرند، توسط نوترون‌هایی که به آشکارساز نفوذ می‌کنند فعال شده که منجر به انتشار پرتوهای گامای آنی از I و Na و همین‌طور رادیوایزوتوپ‌های پرتوزای ¹²⁸I و ²⁴Na می‌شوند که متعاقباً با گسیل ذرات بتا و پرتوهای گاما مشخصه‌ی شان واپاشی می‌کنند و در نتیجه باعث یک زمینه برای این اندازه‌گیری می‌شوند. با بررسی طیف‌های حاصل، نشان دادند که برای داشتن طیف بهتر در گستره‌ی انرژی کم برای رادیوایزوتوپ سدیم، باید پرتوهای نوترونی بسیار شدیدی بعد از انجام آزمایش شود و زمانی که اثرات هم‌فروشی I و Na شناخته شوند، نتایج خوبی به دست خواهد آمد [۱۷].

ناکوی^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ توزیع شدت نوترون گرمایی و تند را با استفاده از روش PGNAA اندازه‌گیری کردند به طوری که در آن آنالیز عنصری تنها از طریق گیراندازی نوترون گرمایی انجام گیرد.

^۱ Monte Carlo N-Particle

^۲ Robin P.Gardner

^۳ A.A.Naqvi

در این کار، شدت نسبی نوترون‌های کند و گرمایی به صورت تابعی از ضخامت کندکننده و فاصله در امتداد نمونه در PGNAA، و استفاده از آشکارسازهای مناسب اندازه‌گیری و همچنین به روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد. برای نوترون تند شدت نسبی در هر دو حالت، هم با افزایش فاصله و هم با افزایش ضخامت کند کننده افزایش می‌یافت. اندازه‌گیری برای نوترون گرمایی هم همانند نوترون کند بوده است. نتایج تجربی با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مقایسه شد. با در نظر گرفتن خطاهای تجربی، افزایش در شدت نوترون با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سازگاری دارد [۱۸].

در سال ۲۰۰۴، پری^۱ به کمک همکارانش به تحلیل و توصیف ویژگی‌های مواد فوتوکرومیک پرداختند. آن‌ها در بررسی خود مواد فوتوکرومیک که حاوی مقدار کمی ناخالصی بودند را انتخاب کردند. با بررسی نمونه های CaF_2 و CeO_2 و TiO_2 و حضور مقدار عناصر و ناخالصی‌ها در آن‌ها، پی به دلیل استفاده از آنالیز فعال‌سازی نوترونی به عنوان یک تکنیک قدرتمند بردند. انجام محاسبات، مطالعات تئوری و مدل‌سازی برای این مواد نشان داد که دانستن اینکه چه عناصری به عنوان ناخالصی و با چه میزانی در شبکه‌ی جامد حضور دارند، و همین‌طور نوع حالت‌های شیمیایی، مغناطیسی و الکترونیکی که می‌توانند از خود نشان دهند، مهم است [۱۹].

سال ۲۰۰۴ ناکوی و همکاران، تحقیقی در رابطه با تایید محاسبات طراحی سیستم PGNAA با استفاده از آشکارسازهای رد هسته‌ای انجام دادند. به این صورت که کندکننده‌ی مستطیل شکلی برای سیستم PGNAA طراحی کرده و محاسبات طراحی این کندکننده که از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو حاصل شده بود را به صورت تجربی و به وسیله‌ی اندازه‌گیری بازده نوترون گرمایی و آشکارسازهای رد هسته‌ای مورد بررسی قرار دادند. از دو آشکارساز در دو طرف نمونه استفاده شد و نتایج برای هر دو نشان داد که بازده شار نوترون گرمایی با افزایش ضخامت کندکننده تا رسیدن به مقدار ماکزیممی در یک ضخامت خاص افزایش می‌یافت و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین از این آشکارسازها برای معلوم کردن رد

^۱ Dale L.Perry

آلفا نیز استفاده شده بود که محاسبات نشان دادند برای هردو آشکارساز، چگالی مسیر هسته‌ای به صورت تابعی از ضخامت کندکننده است. یک مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که سازگاری خوبی بین این دو وجود دارد. نتایج این مطالعه همراه با مطالعه‌ی مشابهی در رابطه با استفاده از کندکننده‌ی استوانه‌ای، مبنای درستی برای کاربرد این آشکارساز در تایید محاسبات طراحی در دستگاه PGNAA فراهم می‌کند [۲۰].

استاماتلاتوس^۱ و گروه همراهش در سال ۲۰۰۷ آنالیز نمونه‌های حجیم بتون را با تکنیک غیر مخرب PGNAA مورد بررسی قرار دادند. پرتوهای گامای تولیدشده توسط واکنش‌های گیراندازی نوترون در عناصر بتون آشکارسازی شده بود. خودجذبی پرتوی گاما، غلظت کلسیم و سیلیسیم در نمونه و همچنین نسبت Si/Ca که به عنوان شاخصی از نسبت سیمان موجود در بتون و یک پارامتر کلیدی تعیین‌کننده‌ی دوام بتون می‌باشد، محاسبه شد. علاوه بر این با توجه به نقش عمده‌ای که نمک‌های کلر در فرسودگی و خوردگی فولاد بتون دارند، تعیین کلر موجود در نمونه نیز انجام شد. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش‌های شیمیایی مقایسه شد که توافق خوبی بین این دو مشاهده شد [۲۱].

سیبوری^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۷، با توجه به نیاز سیستم PGNAA به یک چشمه‌ی نوترونی برای برانگیخته‌کردن هسته‌ی اتمی تحت واکنش‌های گیراندازی نوترون و پراکندگی ناکشسان نوترون، به مقایسه‌ای بین چشمه‌های DD و DT و ^{252}Cf در برانگیختگی نوترونی هسته‌های سبک و متوسط برای کاربردهای PGNAA جهت طراحی بهینه‌ی آن پرداختند. آن‌ها، پرتوهای گامای حاصل از واکنش‌های (n, γ) و (n', n) را در این هسته‌ها و به‌وسیله‌ی چشمه‌های نوترونی ذکر شده، گزارش دادند. قله‌های پرتوهای گامایی که از طیف تجربی استخراج شده بود و همین‌طور نسبت داده‌های اندازه‌گیری شده به

^۱ I.E.Stamatelatos

^۲ E.H.Seabury

محاسبه شده که بیان کننده‌ی انحراف بین محاسبات و تجربه بود نیز گزارش شد که سازگاری خوبی بین آن‌ها وجود داشت [۲۲].

کاراسکو^۱ و تعدادی از همکارانش در سال ۲۰۱۲، آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای آبی در زباله‌های رادیواکتیو را مورد تحلیل قرار دادند. به منظور جلوگیری از آلودگی ذخایر آب‌های زیرزمینی به وسیله‌ی عناصر سمی موجود در زباله‌های رادیواکتیو، این گروه مطالعه‌ای را با استفاده از PGNAA برای عناصری با سطح مقطع گیراندازی بالای نوترون نظیر جیوه، کادمیوم، بور و کروم شروع کردند. در این کار، آن‌ها مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از محاسبات مونت کارلو با پرتوهای گامایی که به‌طور تجربی برای نمونه‌های کوچکی از نیکل، سرب، کادمیوم، آرسنیک، آنتیموان، کروم، منیزیم، زینک، بور و لیتیم اندازه‌گیری شده بودند، انجام دادند. نتایج بیان می‌کردند که پرتوهای گامای حاصل از گیراندازی نوترون برای تشخیص عناصر سمی در زباله‌های رادیواکتیو با اکتیویته‌ی متوسط و عمر طولانی، بسیار مفید هستند و اینکه حتی مقادیر کم جیوه کادمیوم هم قابل شناسایی می‌باشند؛ حتی اگر در قالب‌های بتونی که به‌منظور تضعیف گاما و نوترون طراحی می‌شوند، قرار گیرند [۲۳].

در سال ۲۰۱۳، پنجه^۲ و گروه همکارش، به مطالعه‌ی به‌کارگیری چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ در سیستم PGNAA مورد استفاده در تحلیل سیمان ناخالص پرداختند. مهم‌ترین تکنولوژی استفاده‌شده برای تحلیل گامای آبی حاصل از فعال‌سازی نوترونی، با چشمه‌های نوترونی ^{252}Cf می‌باشد. هزینه و نیمه عمر کوتاه این چشمه‌ها، از مشکلات اصلی در صنعت سیمان هستند. بنابراین این گروه مطالعه‌ای برای توسعه‌ی هندسه‌ی سیستم و امکان‌پذیر بودن استفاده از چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ به صورت یک گزینه‌ی پیشنهادی، انجام دادند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، این چشمه یک انتخاب موثر بوده- است که مهم‌ترین مزیت آن نیمه عمر بالاتر نسبت به چشمه‌ی ^{252}Cf است [۲۴].

^۱ C.Carasco

^۲ Hamed Panjeh

در سال ۲۰۱۳ جین ژائو^۱ و ژیان گو^۲، بهینه‌سازی چشمه‌ی نوترونی در PGNAA را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها شبیه‌سازی با استفاده از مونت کارلو برای طراحی PGNAA با نوترون‌های گرمایی انجام دادند و مواد کندکننده مورد استفاده، مواد بازتابنده و همچنین خروجی نوترون‌های حرارتی چشمه‌ی ²⁵²Cf بهینه شدند. نتایج محاسبات نشان دادند که اثر کندکنندگی لایه‌ی نازک پارافین و لایه‌ی ضخیمی از آب سنگین، بهترین حالت را برای طیف نوترون‌های چشمه‌ی ²⁵²Cf می‌دهد. این کار با چشمه‌ی نوترونی دیگری نیز انجام شد و شار و آهنگ نوترون گرمایی به ترتیب ۳/۰۲ و ۳/۲۷ برابر افزایش یافته‌بودند. نتایج نشان داد که استفاده از این طراحی به‌طور قابل‌توجهی شار نوترون در آنالیز فعال‌سازی را افزایش می‌دهد و به‌کارگیری چشمه‌ی نوترونی شکافت را بهتر می‌کند [۲۵].

شیرمردی و همکارانش در سال ۲۰۱۳، به مطالعه‌ی طراحی سیستم تحلیل‌گر عناصر سبک بافت به روش فعال‌سازی نوترونی (NAA) پرداختند. پس از محاسبات مربوط به تغییرات شار نوترونی با تغییر جنس، ضخامت، شعاع دهانه و طول کلیماتور، دزیمتری سیستم، محاسبات مربوط به حفاظ و دیگر پارامترهای موثر و با توجه به نتایج به‌دست آمده و محاسبات انجام شده، این گروه نشان داد که می‌توان سیستمی جهت تحلیل کمی و کیفی عناصر سبک بافت‌ها را به‌صورت زنده و غیر زنده جهت بررسی میزان تغییرات درصد عناصر، درصد میزان دز دارو در یک قسمت مشخص بافت و... طراحی نمود که میزان دز تابشی آن با توجه به نتایج محاسبات کاملاً ایمن است و کلیه‌ی پارامترهای موثر در فعال‌سازی برای آن بررسی شد و مقادیر بهینه برای هر پارامتر موثر با در نظر گرفتن نتایج محاسبات، انتخاب شد [۲].

علیزاده‌ی تازه‌آباد و گروه همکار در سال ۲۰۱۳، با استفاده از کد محاسباتی MCNPX و نتایج تجربی، ضخامت بهینه برای کندکننده‌ی آب در PGNAA را طراحی کردند. آن‌ها در این تحقیق، یک سیستم PGNAA برای شناسایی عنصر نیتروژن موجود در نمونه طراحی کردند. به علت سطح مقطع بالای

^۱ Zhang Jinzhao

^۲ Tuo Xianguo

برهم‌کنش نوترون‌های حرارتی با عناصر، یک کندکننده از جنس آب برای نمونه در نظر گرفته شد. با استفاده از کد محاسباتی MCNPX، شبیه‌سازی برای هندسه و ضخامت‌های مختلف آب انجام شد تا بیشینه‌ی شار نوترون حرارتی در محل نمونه حاصل شود. هندسه و ضخامت بهینه‌ی کندکننده‌ی حاصل شده از کد، به‌طور تجربی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیری شار نوترون و شار پرتوی گامای حاصل از محاسبات و تجربه با یکدیگر مقایسه شده و با نتایج حاصل شده، ضخامت بهینه‌ی کندکننده تعیین گردید. نتایج نشان دادند که مجموع نوترون‌های فوق‌گرمایی، میانه و تند برای ضخامت ۳ سانتی‌متری کندکننده‌ی آب بیشتر است. در نتیجه برهم‌کنش نوترون حرارتی با نیتروژن در این ضخامت آب، بیشینه است [۲۶].

در سال ۲۰۱۴، فنگ^۱ و جون تائو^۲ شبیه‌سازی مونت کارلویی از سیستم PGNAA برای تعیین عناصر موجود در نمونه‌های سنگی انجام دادند. توزیع‌های نوترون تحت شرایطی با مواد متفاوت، اندازه‌ی کندکننده و فاصله‌ی آن چشمه‌ی نوترونی با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی شد و پارامترهای ساختار بهینه‌ای که بالاترین شار نوترون گرمایی را در اختیار قرار می‌داد، به‌دست آمدند. سیستم PGNAA به‌کار گرفته شده با پارامترهای بهینه بر پایه‌ی چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf طراحی شده بود و نمونه تحت تابش نوترون گرمایی قرار می‌گرفت. با توجه به نتایج حاصل شده، مناسب‌ترین کندکننده و همچنین ضخامت و فاصله بهینه به‌دست آمدند. علاوه بر این، نتایج این کار با نتایج روش XRF مقایسه شدند که در توافق خوبی با هم بودند [۲۷].

غائبی و نیاری در سال ۲۰۱۵، درصد فراوانی مس موجود در خاک یک معدن را با آنالیز فعال‌سازی نوترونی شناسایی کردند. این دو، ابتدا، نمونه‌ای از پودر مس را در فاصله‌های مختلف در مقابل چشمه‌ی نوترونی قرار دادند و با استفاده از یک آشکارساز NAI، میزان فعالیت آن را مشخص کردند و فاصله‌ی

^۱ Zhang Feng

^۲ Liu Jun-tao

که در آن بیشترین فعالیت مشاهده شد را به دست آوردند. سپس در آن فاصله، نمونه‌های خاک حاوی درصد‌های مشخص مس، تحت تابش با نوترون قرار گرفته و میزان فعالیت آن‌ها با میزان فعالیت نمونه‌ی استاندارد مقایسه و دقت اندازه‌گیری محاسبه شد. با محاسبه‌ی سطح زیر منحنی طیف بیشینه‌ی گاما برای هریک از نمونه‌ها و مقایسه‌ی آن با سطح زیر منحنی طیف بیشینه‌ی گامای نمونه‌ی استاندارد، نموداری حاصل شد که نشان دهنده‌ی نسبت درصد اندازه‌گیری شده به درصد واقعی مس بود که در این کار هم‌خوانی‌های خوبی بین دو نتیجه مشاهده شد [۲۸].

در سال ۲۰۱۶ ون بائو^۱ و جمعی از همکاران، مطالعه‌ی روی شناسایی فلزات سنگین در رسوبات را با استفاده از روش PGNAA با به‌کارگیری چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و آشکارساز BGO انجام دادند و برای بررسی سیستم موردنظر از نمونه‌های حاوی کادمیوم و جیوه استفاده کردند و رابطه‌ی خطی بین تعداد پرتوی گامای آنی و غلظت‌هایشان را مورد مطالعه قرار دادند که اثر خودحفاظی نوترون مشاهده شد. تعداد پرتوهای گامای آنی کادمیوم با انرژی ۸/۴۸۴ مگا الکترون‌ولت به‌طور خطی با غلظت افزایش نمی‌یافت در صورتی‌که پرتوهای گامای آنی حاصل از جیوه با انرژی ۵/۹۶۷ رابطه‌ی تقریباً خطی با غلظت داشتند که ناشی از خودحفاظی نوترون بود. [۲۹].

هی^۲ با همکاری گروهش در سال ۲۰۱۷ کاربرد PGNAA برای اندازه‌گیری همزمان کربن و نیتروژن در محلول آبی را بررسی کردند. آن‌ها سیستمی شامل مولد نوترون D-T همراه با آشکارساز BGO را با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو طراحی کردند و نتایج به‌دست آمده را با مقادیر تجربی مقایسه کردند. در این آزمایش، با افزایش غلظت کربن، تعداد قله‌های پرتوهای گامای آنی مشخصه نیز افزایش می‌یافت و رابطه‌ی خطی بین غلظت عناصر و قله‌های مشخصه‌ی آن با روش حداقل مربعات تحلیل شد. از آنجایی‌که نمونه تنها شامل چهار عنصر هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن و کربن بوده، هیچ تداخلی ناشی از

^۱Jia Wen-Bao

^۲ Daqian Hei

همپوشانی قله‌ها روی قله‌ی مشخصه‌ی کربن وجود نداشت. رابطه‌ی خطی در نتایج نیتروژن هم به اندازه‌ی کافی خوب بوده است. همچنین کمینه‌ی غلظت قابل آشکارسازی^۱ (MDC) برای کربن و نیتروژن بر مبنای طیف پرتوی گاما اندازه‌گیری شد و به دلیل پایین بودن شار نوترون و بالا نبودن قدرت آشکارساز مورد استفاده در این آزمایش، نتایج حاصل شده در این کار نسبت به نتایج روشهای دیگر، چندان رضایت‌بخش نبودند [۳۰].

۹-۱ هدف و بیان مسئله

بدون شک آنالیز فعال‌سازی نوترونی یکی از بهترین تکنیک‌های تحلیلی هسته‌ای در توصیف کیفی و کمی نمونه‌های ناشناخته است که به دلیل دقت و حساسیت بالای آن و همچنین غیرمخرب بودن این روش، کاربرد و استفاده از آن روز به روز در حال افزایش است. هدف اصلی پژوهش حاضر، آنالیز عنصری نمونه‌ی سرامیک بر مبنای روش آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای آنی است. سرامیک‌ها دسته مواد متنوع و جدیدی هستند که به دلیل خواص مطلوب و قابل توجه (از جمله حفظ پایداری ابعادشان در محدوده‌های دمایی بالا و دارا بودن استحکام مکانیکی بالا و همچنین مقاومت شیمیایی و نسبت سفتی به وزن بسیار خوبی که دارند) کاربرد چشمگیری به‌ویژه در سال‌های اخیر در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت هوافضا داشته‌اند. [۳۱].

با توجه به اهمیت این مواد، در نظر داریم با اندازه‌گیری طیف انرژی نوترونی به آنالیز آن بپردازیم. برای این منظور از شبیه‌سازی به روش‌های عددی استفاده می‌کنیم و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۱۰-۱ نوآوری

در این مطالعه سه نمونه‌ی Si_3N_4 ، ZrO_2 و B_4C که از نمونه سرامیک‌های مهم و پرکاربرد در صنایع مهندسی می‌باشند، مورد بررسی و آنالیز عنصری قرار گرفتند. به‌منظور مقایسه بهتر از دو چشمه‌ی

^۱ Minimum Detectable Concentrations

نوترونی ^{241}Am -Be و ^{252}Cf استفاده کردیم و همچنین برای تحلیل کامل تر نتایج، آشکارساز HPGe که دارای قدرت تفکیک انرژی بیشتری هست، به کار گرفته شد.

۱-۱۱ ساختار و فصل بندی پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل ارائه شده است. فصل اول گذری بر آنالیز فعال سازی نوترونی و مروری بر مطالعات پیشین است. در فصل دوم، به معرفی روش آنالیز فعال سازی نوترونی گامای آنی و امکانات مورد استفاده در آن پرداخته شده است. فصل سوم، به معرفی کد MCNP و شبیه سازی برنامه‌ی مورد نظر بیان می شود. در فصل چهارم با ترسیم نتایج حاصل از محاسبات شبیه سازی با نرم افزارهای مخصوص به تحلیل طیف به دست آمده پرداختیم. آخرین فصل از این پایان نامه به نتیجه گیری و جمع بندی دستاورد-های حاصل از این پژوهش اختصاص دارد. در این بخش به طور خلاصه به مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش اشاره می شود.

فصل دوم:

آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای آنی

۱-۲ مقدمه ای بر آنالیز فعال سازی نوترونی گامای آنی

همه‌ی تکنیک‌های هسته‌ای آنالیز شیمیایی شامل برهم‌کنش بین یک پرتابه‌ی ورودی (نوترون، ذرات باردار یا فوتون گاما) و یک هسته‌ی هدف است. نتیجه‌ی این برهم‌کنش معمولاً تشکیل دو محصول، یکی سبک و دیگری سنگین‌تر است که محصول سبک‌تر اساساً فوتون گاما، نوترون یا ذره‌ی باردار کوچکی است. می‌توان شکل برهم‌کنش را به صورت زیر نوشت:



البته این فرم نوشتاری به هیچ عنوان احتمال تشکیل هسته‌ی مرکب و سپس تجزیه‌ی آن به دو محصول را رد نمی‌کند.

در آنالیز فعال‌سازی نوترونی گامای آنی، از نوترون به عنوان پرتابه استفاده می‌شود و محصول سبک، فوتون گاما می‌باشد. PGNAA یک روش قدرتمند هسته‌ای آنالیز عنصری است که می‌تواند برای تعیین ترکیب یک نمونه با استفاده از پرتوهای گامای به دست آمده در نتیجه‌ی پرتودهی با نوترون، استفاده شود. در این روش نمونه تحت تابش نوترون قرار می‌گیرد. هنگام عبور نوترون‌ها از ماده، شدت باریکه در اثر واکنش‌های هسته‌ای کاهش می‌یابد و بخشی از نوترون‌ها از باریکه حذف می‌شوند. پس از جذب یک نوترون توسط هسته، ایزوتوپ جدیدی با عدد جرمی یک واحد بیشتر به وجود می‌آید که حاصل این واکنش به صورت یک هسته‌ی برانگیخته است. هسته‌ی برانگیخته به طور آنی (در مدت زمانی از مرتبه‌ی 10^{-12} ثانیه) یک پرتوی گاما که خاص آن هسته است، گسیل می‌کند. انرژی گامای تابشی مساوی با انرژی جدایی نوترون از هسته‌ی جدید است. معمولاً هر عنصر پس از جذب نوترون چند پرتوی گامای آنی با شدت‌های متفاوت گسیل می‌کند که از میان آن‌ها، پرتوهایی که دارای شدت و انرژی بیشتری بوده و با پرتوهای گامای ناشی از عناصر دیگر تداخل نمی‌کنند برای شناسایی آن عنصر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

قدرت نفوذ زیاد نوترون و گاما در ماده سبب می‌شود که این روش، PGNAA، برخلاف بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری دارای خصوصیات مهمی باشد، از جمله آنالیز مواد در نمونه‌های حجیم، آنالیز فوری در محل، غیر مخرب بودن روش و عدم نیاز به آماده‌سازی قبلی نمونه. از سوی دیگر، با توجه به اینکه پرتوهای گامای آبی بلافاصله پس از جذب نوترون در هسته گسیل می‌شوند، مشکل ناشی از نیمه‌عمرهای خیلی کوتاه و خیلی طولانی مطرح نیست و کلیه‌ی عناصر که سطح مقطع جذب ماکروسکوپی نداشته و دارای پرتوهای گامای آبی با شدت مناسب باشند، توسط این روش قابل شناسایی هستند. برای اکثر عناصر، سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی خیلی بیش از سطح مقطع پراکندگی ناکشسان نوترون‌های سریع است و اغلب پرتوهای گامای آبی عناصر در گستره‌ی ۵۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت می‌باشند [۱۶۳۳].

۲-۲ امکانات لازم برای سیستم PGNAA

ضروریات اساسی مورد نیاز برای انجام تجزیه و تحلیل نمونه‌ها توسط PGNAA شامل چشمه‌های نوترونی، تجهیزات مناسب و دقیق برای آشکارسازی پرتوهای گاما و اطلاعات کافی از برهم‌کنش‌هایی است که بین نوترون با هسته‌های هدف رخ می‌دهد، می‌باشد که در ادامه به شرح مختصری از این موارد می‌پردازیم.

۱-۲-۲ چشمه‌های نوترونی

با توجه به اینکه استفاده از چشمه‌های نوترونی به منظور پرتو دهی نمونه و انجام آزمایش‌های فعال‌سازی نقشی اساسی دارد، به‌طور خلاصه به معرفی انواع چشمه‌های نوترونی می‌پردازیم. سه منبع اصلی قابل دسترس به‌عنوان چشمه‌ی نوترونی عبارتند از:

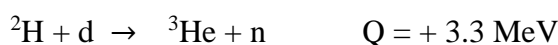
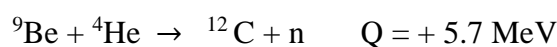
- راکتورهای هسته‌ای
- شتاب‌دهنده‌های یون و الکترون شامل مولدهای نوترونی
- چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترونی

۲-۱-۲-۲ راکتورهای هسته‌ای

راکتورهای هسته‌ای تجهیزات بسیار بزرگی هستند که در آن‌ها از مواد شکافت‌پذیر به‌ویژه ^{235}U که با شکافت به دو هسته‌ی سبک‌تر و انتشار همزمان نوترون که خود موجب شکافت بیشتر طی واکنش‌های زنجیره‌ای هستند، استفاده می‌شود که می‌توان از واکنش‌های حاصل به‌عنوان چشمه‌ی نوترونی بهره‌جست. نوترون‌های حاصل از شکافت به‌شدت پرنرژی هستند. شار نوترون در قلب یک راکتور شکافت هسته‌ای، خیلی بالا و نوعاً 10^{14} نوترون در سانتی متر مربع در ثانیه می‌باشد. طیف انرژی تا (۷-۵) مگاالکترون‌ولت ادامه می‌یابد، ولی قله‌ها در (۲-۱) مگاالکترون‌ولت قراردارند. انرژی این نوترون‌ها عموماً در داخل راکتور به انرژی گرمایی کاهش یافته ولی نوترون‌های سریع نیز در قلب راکتور حضور دارند. از نظر عملی می‌توان با ایجاد کانال کوچکی در حفاظ و محفظه‌ی راکتور، باریکه‌ای از نوترون‌ها را برای انجام آزمایش‌های مختلف به داخل آزمایشگاه برد. شار نوترونی بالای حاصل از راکتور، خصوصاً برای ایجاد ایزوتوپ‌های پرتوزا از طریق گیراندازی نوترون مورد استفاده‌اند که نمونه‌ی آن بررسی تحقیقاتی به روش فعال‌سازی نوترون است.

۲-۱-۲-۲ شتاب‌دهنده‌های یون و الکترون شامل مولدهای نوترونی

با استفاده از برهم‌کنش‌های (p,n) ، (d,n) یا (α,n) اقدام به تولید شارهای نوترونی می‌نمایند. این امر نیاز به یک شتاب‌دهنده برای ایجاد یک باریکه‌ای از ذرات دارد تا واکنش را آغاز کنند. به همین دلیل استفاده از آن‌ها به آسانی کاربرد چشمه‌های دیگر نیست. با این حال با انتخاب دقیق انرژی تابشی و زاویه‌ای که در آن نوترون‌ها گسیل می‌شوند، می‌توان باریکه‌ی نوترون تک انرژی قابل قبولی را به‌دست آورد. پاره‌ای از واکنش‌های مورد استفاده عبارتند از:



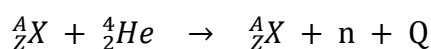


۲-۱-۳ چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترونی

چشمه‌های رادیوایزوتوپی به سه دسته (α, n) ، (γ, n) و چشمه‌های شکافت خودبه‌خودی تقسیم می‌شوند.

- چشمه‌های (α, n) :

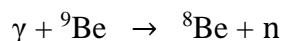
واکنش‌های (α, n) به‌صورت زیر با هسته‌های سبک انجام می‌پذیرد.



این واکنش‌ها می‌توانند انرژی‌زا ($Q > 0$) یا انرژی‌گیر ($Q < 0$) باشند. از واکنش (α, n) روی عناصر سبک که منجر به کشف نوترون شد هنوز هم به‌منظور تولید نوترون استفاده می‌شود. ذره‌ی آلفا در این واکنش را می‌توان از یک عنصر پرتوزای گسیلنده‌ی آلفا گرفت. بهترین ایزوتوپ‌های گسیل‌کننده‌ی آلفا که در ساخت چشمه‌های نوترونی (α, n) می‌توان از آن‌ها بهره برد، عبارتند از ${}^{241}\text{Am}$ ، ${}^{226}\text{Ra}$ ، ${}^{238}\text{Pu}$ ، ${}^{241}\text{Pu}$. این چشمه‌ها معمولاً از مخلوط اکسید هسته‌ی آلفا و ماده‌ی هدف ساخته می‌شوند. این مخلوط در محفظه‌ای با اندازه‌ی استاندارد از جنس فولاد قرار می‌گیرد. نیمه‌عمر این چشمه‌ها به نیمه‌عمر گسیلنده‌ی آلفا بستگی دارد. بیشتر گسیلنده‌های آلفا، ذرات آلفایی با انرژی تقریبی ۵/۵ مگا الکترون‌ولت گسیل می‌کنند.

- چشمه‌های (γ, n) یا فوتونوترون:

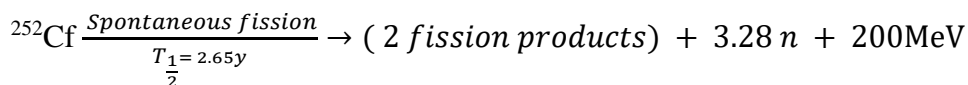
بعضی از ایزوتوپ‌های گسیلنده‌ی گاما وقتی با یک هدف مناسب مخلوط می‌شوند می‌توانند نوترون تولید کنند. این نوترون‌ها را که حاصل جذب انرژی فوتون گاما و برانگیخته شدن هسته‌ی هدف است، فوتونوترون می‌نامند. مزیت فوتونوترون آن است که می‌توان نوترون‌ها را خیلی بیشتر تک انرژی کرد، خصوصاً اگر چشمه‌ی فوتون تک انرژی باشد. مثلاً ${}^{24}\text{Na}$ پرتوی گاما با انرژی ۲/۶ مگا الکترون‌ولت گسیل می‌کند. جذب این فوتون برای غلبه بر انرژی بستگی نوترون در ${}^9\text{Be}$ کافی خواهد بود.



بهره‌ی این فرایند قابل قبول است ($10^6 \times 2$ نوترون بر ثانیه به ازای هر کوری از فعالیت ${}^{24}\text{Na}$) اما نیمه‌عمر آن کوتاه و ۱۵ ساعت است. ایزوتوپ با طول عمر بیشتر (۶۰ روز) ${}^{124}\text{Sb}$ است که یک پرتوی قوی گاما با انرژی اندکی بالاتر از انرژی بستگی نوترون در ${}^9\text{Be}$ تولید می‌کند. انرژی نوترون گسیل شده در این فرایند خیلی پایین‌تر و در حدود ۲۴ کیلوالکترون‌ولت است. مشکل اساسی در این روش، پیدا نمودن یک گسیلنده‌ی گامای تک انرژی با نیمه‌عمر بالا است.

- چشمه‌های حاصل از شکافت خودبه‌خودی

برخی از هسته‌های سنگین به‌طور خودبه‌خودی دستخوش شکافت می‌شوند که نتیجه‌ی آن علاوه بر دو پاره‌ی شکافت، تعدادی نوترون نیز می‌باشد. قدرت این چشمه‌ها هنگامی که تحت تابش نوترون قرار می‌گیرند، به‌دلیل افزایش شکافت‌های ناشی از جذب نوترون بسیار افزایش می‌یابد. اگر این چشمه‌های شکافت درون حفاظ مناسب با ضخامت کافی قرار داده‌شوند، پاره‌های شکافت، ذرات بتا و مقداری از فوتون‌های گاما جذب شده و تنها نوترون‌های با قدرت نفوذ زیاد می‌توانند خارج شوند. مهم‌ترین چشمه‌ی نوترونی از نوع شکافت، ${}^{252}\text{Cf}$ است با نیمه‌عمر ۲/۶۵ سال. نوترون‌ها مستقیماً در فرایند شکافت، با آهنگ حدود ۴ نوترون در هر شکافت تولید می‌شوند.



شکافت تنها ۳ درصد واپاشی را تشکیل می‌دهد و بقیه از نوع واپاشی آلفا است. نیمه‌عمر برای هر شکافت خودبه‌خودی، ۸۵/۵ سال و برای ساطع کردن آلفا، ۲/۷۳ سال است و نیمه‌عمر مؤثر ۲/۶۵ سال است.

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{\alpha}} + \frac{1}{T_{sf}}$$

آهنگ تولید نوترون $10^{12} \times 2/3$ نوترون در ثانیه به ازای هر گرم ${}^{252}\text{Cf}$ یا $10^9 \times 3/4$ نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از ${}^{252}\text{Cf}$ است [۴،۳۳].

۲-۲-۲ برهم کنش نوترون با ماده

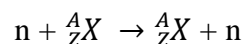
نوترون و پروتون اجزاء تشکیل دهنده‌ی هسته‌ها هستند. با توجه به بی‌بار بودن نوترون‌ها، با الکترون‌ها برهم‌کنش نمی‌کنند و این ذرات به راحتی از سد کولنی گذشته و به داخل هسته نفوذ می‌کنند. در نتیجه، احتمال برهم‌کنش‌های هسته‌ای برای نوترون بیش از ذرات دیگر است و می‌تواند با هر انرژی با هسته برهم‌کنش کند و مطابق با یافته‌های فرمی، نوترون‌های با انرژی پایین‌تر معمولاً نسبت به نوترون‌های با انرژی بالاتر، آسان‌تر برهم‌کنش می‌کنند که نوع برهم‌کنش‌ها برحسب انرژی متفاوت است [۴،۶].

۳-۲-۲ انواع برهم‌کنش‌های نوترون

برهم‌کنش‌های نوترون با هسته‌ها را به دو بخش عمده تقسیم می‌کنیم.

۱-۳-۲-۲ پراکندگی

در این نوع برهم‌کنش، نوترون با یک هسته برهم‌کنش می‌کند، اما هر دو ذره پس از واکنش دوباره ظاهر می‌شوند. یک برخورد پراکندگی را به صورت یک واکنش (n,n) یا به صورت



نمایش می‌دهند. پراکندگی ممکن است کشسان یا ناکشسان باشد. در پراکندگی کشسان انرژی جنبشی کل دو ذره‌ی برخوردکننده پایسته است. به زبان ساده‌تر، انرژی جنبشی بین دو ذره باز-توزیع می‌شود. در پراکندگی ناکشسان، بخشی از انرژی جنبشی به صورت انرژی برانگیختگی به هسته داده می‌شود. پس از برخورد، هسته‌ی برانگیخته با گسیل یک یا تعداد بیشتری پرتوی گاما وا می‌باشد.

واکنش‌های پراکندگی عامل کندانس‌سازی نوترون‌ها در راکتورها هستند. انرژی میانگین نوترون‌هایی که در شکافت هسته گسیل می‌شوند ۲ مگا الکترون‌ولت است. احتمال اینکه نوترون شکافت‌القاء کند، برای نوترون‌های کند- گرمایی - خیلی بالاتر است. نوترون‌های سریع انرژی جنبشی خود را بر اثر برخوردهای پراکندگی با هسته‌های ماده‌ی کندکننده که معمولاً آب یا گرافیت است، از دست می‌دهند [۶].

۲-۳-۲-۲ جذب

اگر برهمکنش به صورت جذب باشد، نوترون‌ها عموماً توسط هسته جذب می‌شوند و تابش‌های ثانویه را تولید می‌کنند. تابش‌های ثانویه، نوعاً ترکیبی ذرات باردار سنگین، نوترون‌ها، فوتون‌ها یا هسته‌های پراکنده شده از واکنش‌های هسته‌ای هستند. مقدار انرژی جنبشی نوترون، اثر زیادی بر میزان واکنش نوترون با هسته دارد. واکنش‌های جذبی اصولاً به فرم (n,p) ، (n,α) ، $(n,2n)$ ، (n,γ) و واکنش‌های شکافت هستند [۶].

۲-۲-۴ طیف‌سنجی پرتوی گاما

هدف اصلی در طیف‌سنجی گاما، آشکارسازی پرتوهای گامای منتشرشده از یک چشمه‌ی رادیواکتیو، تقسیم‌بندی با توجه به انرژی آن‌ها و همچنین محاسبه‌ی اکتیویته‌ی این پرتوها می‌باشد. بدین منظور به بررسی مکانیسم برهم‌کنش پرتوهای گاما با ماده و همین‌طور آشکارساز مورد استفاده در این کار می‌پردازیم [۱۱].

۲-۳-۳ مقدمه

فوتون‌ها، تابش‌های الکترومغناطیسی هستند که با توجه به منشا گسیل و انرژی خود به دو دسته X و γ تقسیم می‌شوند. آشنایی با انواع اندرکنش این پرتوها و مطالعه اتفاقاتی که برای یک پرتو در طول حرکت در ماده می‌افتد، مبنای مطالعات بیشتر بر روی آن‌ها است. بنابراین فصل حاضر به مطالعه سازوکارهای برهم‌کنش فوتون‌های X و γ و تضعیف شدت و انرژی آن‌ها در ماده می‌پردازد.

۲-۳-۱ برهم‌کنش تابش با ماده

هنگامی که یک پرتو وارد ماده می‌شود با توجه به ماهیتی که دارد با ذرات ماده برهم‌کنش انجام می‌دهد. پرتوهای یوننده شامل سه دسته کلی است:

(۱) ذرات باردار نظیر شامل یون‌های سبک ($Z \leq 2, A \leq 4$) مثل $H, He, e^+, e^-, \beta^+, \beta^-$ و یون‌های

سنگین؛

(۲) فوتون‌ها شامل پرتوهای X و γ ؛

(۳) نوترون (n) [۶].

اثراتی که پرتوهای یوننده بر محیط اطراف خود بر جای می‌گذارند در مجموع به چهار عامل بستگی دارد که عبارت هستند از:

- نوع پرتو،
 - انرژی پرتو،
 - تعداد ذرات یا پرتوها، و
 - ماهیت شیمیایی ماده‌ای که در معرض تابش قرار گرفته است [۶].
- توانایی نسبی انواع مختلف پرتوهای یوننده برای نفوذ در بافت‌های مختلف، متفاوت است. به دلیل توانایی نفوذ بالا، پرتوهای X و γ به مراتب خطرناک‌ترین نوع پرتو هستند زیرا بخش اعظم انرژی خود را در اثر برهم‌کنش‌های متفاوت در بافت و محیط به جا می‌گذارند [۳۴]. بخش‌های بعد به بررسی اندرکنش‌های متنوع این ذرات و سازوکارهای تضعیف آن اختصاص داده شده است.

۲-۳-۲ اندرکنش‌های فوتون

پیش از شروع بحث، بهتر است با فوتون و ماهیت آن آشنا شویم. فوتون‌ها را بر اساس منشا تولید می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی کرد:

- پرتوهای گاما، که تابش‌های الکترومغناطیسی حاصل از گذارهای هسته‌ای هستند؛
- پرتوهای X پیوسته، که حاصل از شتاب گرفتن الکترون‌های آزاد یا ذرات باردار و پدیده تابش ترمزی هستند؛

• پرتوهای X مشخصه، که در اثر گذار الکترون‌های پیوندی در لایه‌های اتمی (K, L, M, و ...) تابش می‌شوند؛

• تابش نابودی، که حاصل از ترکیب پوزیترون و نگاترون است [۳۴].

در تقابل فوتون با ماده، احتمال رخداد چند فرایند اندرکنشی وجود دارد: پراکندگی ریلی^۱، پراکندگی تامسون^۲، پراکندگی دلبروک^۳، پراکندگی رزونانس هسته^۴، فروپاشی هسته^۵، تولید مزون^۶، اثر فوتوالکتریک^۷، پدیده کامپتون^۸، و تولید زوج^۹. در محدوده انرژی ۱۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت سه فرآیند اساسی اثر فوتوالکتریک، پدیده کامپتون، و تولید زوج در برهمکنش فوتون با ماده اهمیت می‌یابد. احتمال وقوع هر یک از این برهمکنش‌ها به انرژی فوتون و عدد اتمی ماده بستگی دارد. ویژگی مهم برهمکنش پرتو X یا γ با ماده از طریق سه سازوکار فوق، تولید ذره باردار پرانرژی (الکترون و پوزیترون) است که انرژی خود را با یون‌سازی و برانگیختگی از دست می‌دهد. به همین دلیل گاهی اوقات پرتو X یا γ را تابش یون‌ساز غیرمستقیم^{۱۰} می‌نامند [۳۵].

۲-۳-۱ اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک برخوردی میان یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید است که به موجب آن، فوتون نابود شده و یکی از الکترون‌های اتمی از سطح ماده جدا می‌شود که فوتوالکترئون^{۱۱} نام دارد. اثر فوتوالکتریک از جمله فرایندهای گسیل میدانی^{۱۲} است زیرا فوتون، الکترون را در میدان مغناطیسی خود درگیر

^۱ Rayleigh Scattering

^۲ Thomson Scattering

^۳ Delbruck Scattering

^۴ Nuclear Resonance Scattering

^۵ Nuclear Decay

^۶ Meson Production

^۷ Photoelectric Effets

^۸ Compton Scattering

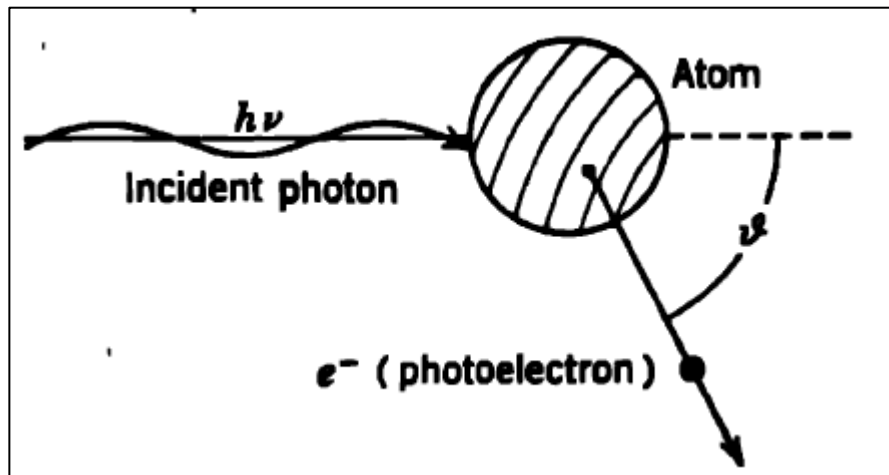
^۹ Pair Production

^{۱۰} Indirect Ionizing Radiation

^{۱۱} Photoelectron

^{۱۲} Field Emission

می‌کند و با دادن انرژی کافی به آن موجب جدا شدن الکترون از اتم می‌گردد. برهمکنش فوتوالکتریک ترجیحاً با الکترون‌های مقیدتر به اتم صورت می‌گیرد، بنابراین الکترون معمولاً از لایه‌های K یا L برانگیخته می‌شود [۳۴].



شکل ۱-۲ اثر فوتوالکتریک [۳۴]

از پایستگی انرژی داریم:

$$T_e - T_A = h\nu - BE \quad (1-2)$$

که در این رابطه T_e انرژی جنبشی الکترون، $E_\gamma = h\nu$ انرژی فوتون فرودی، BE انرژی بستگی الکترون اتمی مقید و T_A انرژی جنبشی اتم پس‌زده است که بدلیل کوچکی از آن صرف‌نظر کرده و می‌نویسیم

$$T_e = h\nu - BE \quad (2-2)$$

با جدا شدن الکترون از لایه داخلی دو پدیده ممکن است رخ دهد:

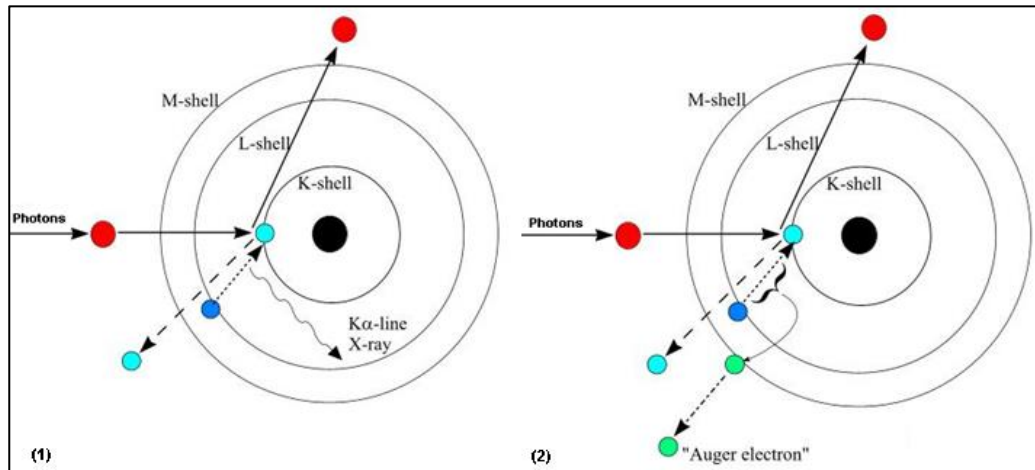
۱. گسیل پرتو X مشخصه

زمانی که برخورد فوتون موجب جدا شدن الکترونی از لایه داخلی اتم می‌شود، جای خالی آن با الکترونی از لایه بالاتر پر می‌شود و اختلاف انرژی لایه‌ها به صورت پرتو X گسیل می‌گردد. مطالعه این پرتو، نوع گذار صورت گرفته در لایه‌های اتمی را نشان می‌دهد و به همین دلیل به آن پرتو X مشخصه^۱ می‌گویند [۳۳].

^۱ Characteristic X-ray

۲. گسیل الکترون اوژه

زمانی که برخورد فوتون موجب جدا شدن الکترونی از لایه داخلی اتم می‌شود، جای خالی آن با الکترونی از لایه بالاتر پر می‌شود و اختلاف انرژی لایه‌ها موجب جدا شدن الکترونی از لایه‌های بیرونی اتم می‌گردد. این الکترون را اوژه^۱ می‌نامند [۳۴].



شکل ۲-۲ رویداد (۱) گسیل پرتو X مشخصه و (۲) گسیل الکترون اوژه [۳۴]

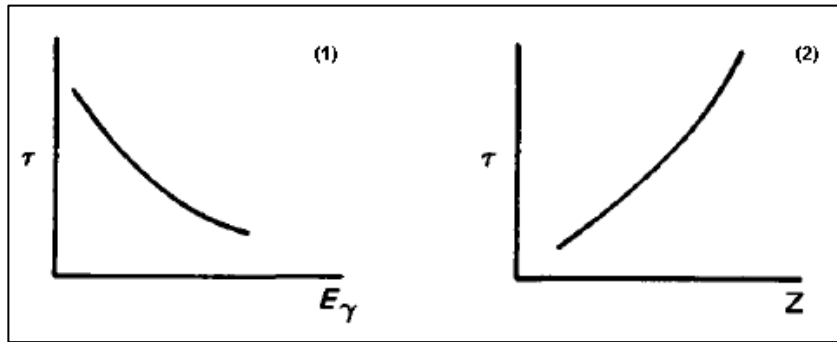
احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک را با سطح مقطع فوتوالکتریک^۲ یا ضریب فوتوالکتریک بیان می‌کنند که بصورت زیر تعریف شده است [۶]:

$$\tau(m^{-1}) = const. N \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \quad (۳-۲)$$

که n و m مقادیر تجربی و به ترتیب برابر با ۴ یا ۵ و مقداری بین ۳ تا ۳/۵ هستند. همانطور که از رابطه (۳-۲) و نمودارهای شکل (۳-۲) مشخص است هر چه عدد اتمی ماده بیشتر باشد یا هرچه فوتون پرا انرژی‌تر باشد، احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک بالاتر است [۶].

^۱ Auger Electron

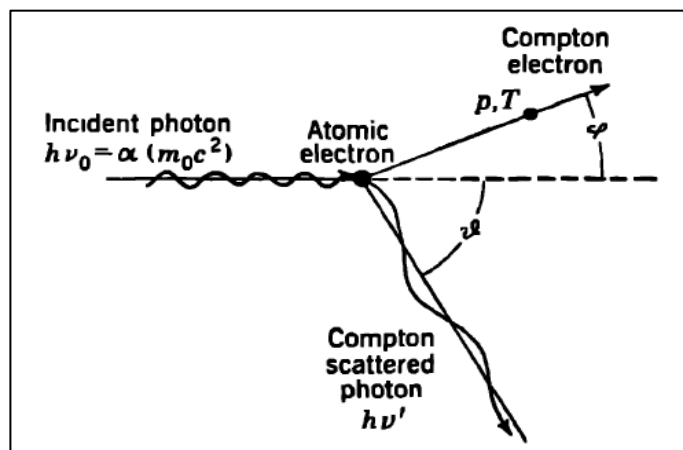
^۲ Photoelectric Cross-section



شکل ۳-۲ وابستگی سطح مقطع فوتوالکتریک به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۶]

۲-۲-۳-۲ پراکندگی کامپتون

اثر کامپتون، پراکندگی همدوس فوتون به حساب می‌آید و عبارت است از برهم‌کنش یک فوتون و یک الکترون آزاد. البته، در فرایند برخورد فوتون X یا گاما با الکترون‌های مقید صورت می‌گیرد اما با توجه به این که انرژی فوتون‌ها از مرتبه‌ی چند ده کیلوالکترون‌ولت تا چند مگا الکترون‌ولت است در حالی که انرژی بستگی الکترون‌ها از مرتبه‌ی کیلوالکترون‌ولت می‌باشد، می‌توان الکترون‌های اتمی را آزاد در نظر گرفت. فرض می‌کنیم الکترون در ابتدا ساکن باشد، پس از برخورد انرژی و راستای حرکت فوتون تغییر می‌کند. این تغییر، با توجه به پایستگی انرژی، بصورت انرژی جنبشی به الکترون داده می‌شود [۳۴].



شکل ۴-۲ پدیده کامپتون [۳۴]

$$T_e = E_\gamma - E_{\gamma'} \quad (۴-۲)$$

بر اساس پایستگی انرژی

$$h\nu + E_e = h\nu' + E_e' \quad (۵-۲)$$

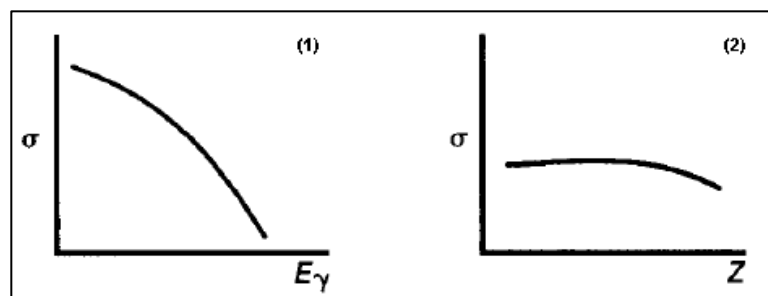
در این رابطه $h\nu$ و $h\nu'$ به ترتیب انرژی فوتون قبل و بعد از برخورد و E_e و E_e' نیز انرژی کل الکترون قبل و بعد از برخورد است. بنا بر پایستگی اندازه‌ی حرکت

$$p_\gamma = p_{\gamma'} + p_e \quad (6-2)$$

به کمک روابط (۵-۲) و (۶-۲) و رابطه‌ی نسبیتی انرژی و تکانه برای الکترون، یعنی $E_e'^2 = p_e'^2 C^2 + E_0^2$ ، و با توجه به شکل (۴-۲) می‌توان به رابطه‌ی مهم «جابجایی کامپتون^۱» بصورت زیر دست یافت:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (7-2)$$

که ثابت $h/mc = 2.426 \times 10^{-10}$ cm، به طول موج کامپتون^۲ معروف است [۳۵]. با توجه به نمودارهای شکل (۵-۲) احتمال برهمکنش کامپتون با افزایش انرژی در محدوده رادیولوژی تشخیصی افزایش و در محدوده انرژی ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت تا ۱ مگا الکترون‌ولت مقداری ثابت است ولی پس از این انرژی احتمال وقوع کامپتون کاهش می‌یابد [۳۵]. همچنین، احتمال وقوع کامپتون تقریباً مستقل از عدد اتمی و وابسته به چگالی الکترونی است. در پدیده کامپتون، فوتون ترجیحاً با الکترون‌های نامقید یعنی الکترون‌های لایه‌های خارجی اتم برهم‌کنش می‌کند [۶].



شکل ۵-۲ وابستگی سطح مقطع کامپتون به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۶]

۳-۲-۳-۲ پدیده تولید زوج

وقوع این برهمکنش، نیازمند پرتوی γ با انرژی بیش از 1.022 مگاالکترون‌ولت است. با عبور پرتوی γ با انرژی بیش از این مقدار، از میدان الکتریکی هسته، یک الکترون و یک پوزیترون تولید می‌شود و در

^۱ Compton Shift

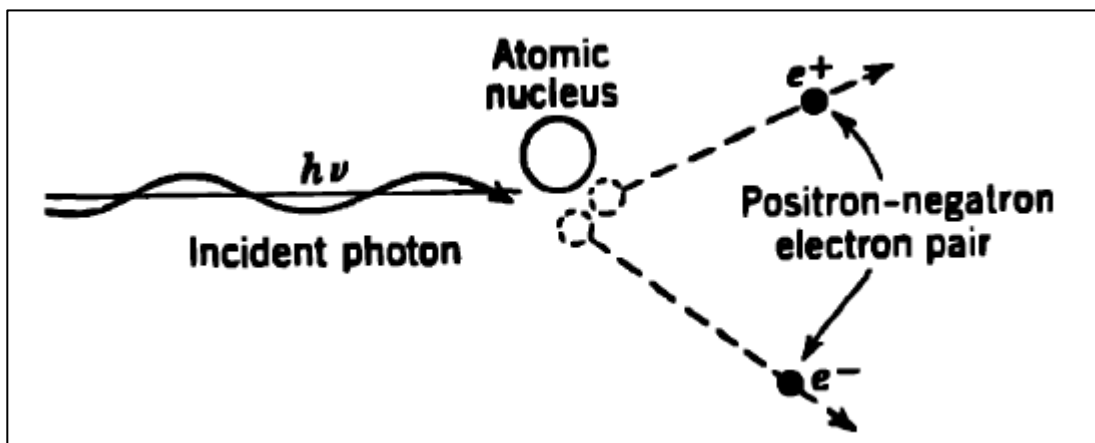
^۲ Compton Wavelength

حقیقت بخشی از انرژی پرتوی γ به ماده تبدیل می‌شود. این پدیده، تولید زوج نامیده می‌شود. اگر این پدیده در مجاورت الکترون رخ دهد، انرژی حداقل مورد نیاز برای آن $2/044$ مگاالکترون‌ولت است [۳۴ و ۳۵]. انرژی مازاد پرتوی گاما به صورت انرژی جنبشی بین e^+ و e^- تقسیم می‌شود:

$$T_+ + T_- = E_\gamma - 1.022MeV \quad (۸-۲)$$

احتمال رخداد تولید زوج، بنام سطح مقطع تولید زوج^۱، تابع پیچیده‌ای از Z و E_γ است که بصورت زیر تعریف شده است [۶]:

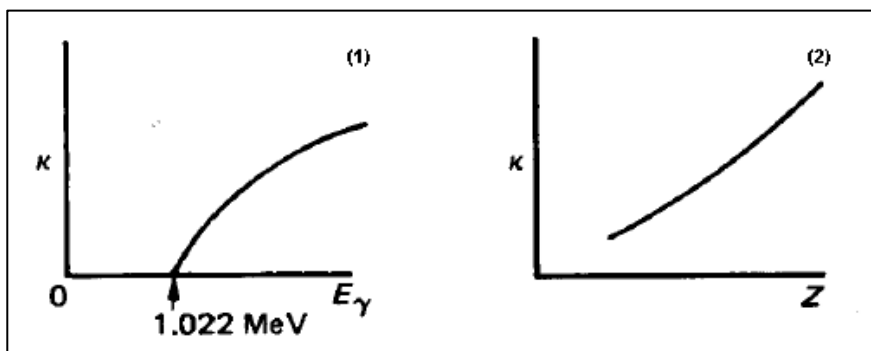
$$\kappa = Z^2 f(E_\gamma, Z) \quad (۹-۲)$$



شکل ۶-۲ پدیده‌ی تولید زوج [۳۴]

از رابطه (۹-۲) و نمودارهای شکل (۷-۲) مشخص است که احتمال تولید زوج برای انرژی‌های کمتر از $1/022$ مگا الکترون‌ولت، صفر است و در انرژی‌های بیش از این حد با افزایش انرژی، زیاد می‌شود تا این که در انرژی‌های بیش از 10 مگاالکترون‌ولت برهم‌کنش غالب خواهد بود. احتمال تولید زوج برای یک اتم با مربع عدد اتمی متناسب است [۶].

^۱ Pair Production Cross-section



شکل ۷-۲ وابستگی سطح مقطع تولید زوج به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۶]

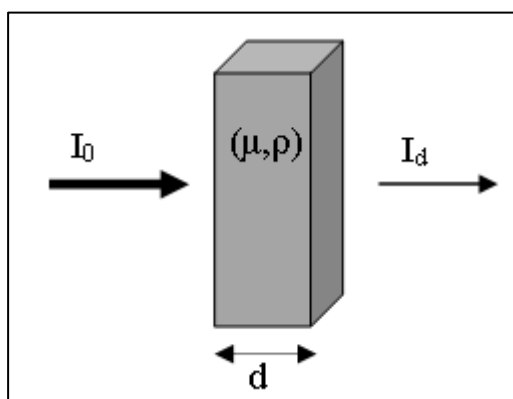
۳-۳-۲ جذب و تضعیف فوتون

باریکه‌ای از پرتوهای موازی X یا γ با انرژی E_0 به ورقه نازکی به سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع و ضخامت d می‌تابد. با عبور پرتوها از این ورقه، سه رویداد ممکن است اتفاق افتد:

۱- فوتون کاملاً توسط ماده جذب شود،

۲- فوتون با کاهش انرژی پراکنده شود،

۳- فوتون بدون برهمکنش از ماده عبور کند [۳۵].



شکل ۸-۲ تضعیف باریکه گاما در عبور از ماده [۶]

عبور پرتوی X یا γ از یک ماده به انرژی پرتو، ماهیت ماده (چگالی و عدد اتمی) و ضخامت ورقه بستگی دارد، بطوری که اگر شدت اولیه باریکه I_0 و شدت پرتوهای خروجی I_d باشد:

- با افزایش انرژی پرتوها، اختلاف شدت پرتوهای خروجی و اولیه کمتر می‌شود؛
- با افزایش عدد اتمی ماده، اختلاف شدت پرتوهای خروجی و اولیه بیشتر می‌شود؛
- با افزایش چگالی ماده، اختلاف شدت پرتوهای خروجی و اولیه بیشتر می‌شود؛

- با افزایش ضخامت ماده، اختلاف شدت پرتوهای خروجی و اولیه بیشتر می‌شود [۳۴].

۲-۳-۴ ذخیره انرژی فوتون‌ها با

$$E < 1.022 \text{ MeV} \quad 2-3-4-1$$

پدیده‌ی فوتوالکتریک، نابودی فوتون و تولید الکترون آزاد با انرژی جنبشی $E_{\gamma} = -BE$ را به دنبال دارد. به دلیل برد کم، تمام انرژی الکترون در آشکارساز ذخیره می‌شود، در پی این رویداد الکترونی از لایه‌های بیرونی به حفره‌ی ایجاد شده فرومی‌افتد و چون این گذار الکترونی است پرتو X با انرژی BE گسیل می‌شود که تمام انرژی آن ذخیره می‌شود.

برخورد کامپتون پراکندگی فوتون و الکترون را به دنبال دارد. به دلیل برد کم، همه‌ی انرژی الکترون در آشکارساز ذخیره می‌شود، فوتون پراکنده احتمالاً باز هم برهم کنش می‌کند و چون انرژی آن کم و کمتر می‌شود احتمال وقوع فوتوالکتریک بیشتر شده و فرایند قبل رخ می‌دهد [۶،۳۷].

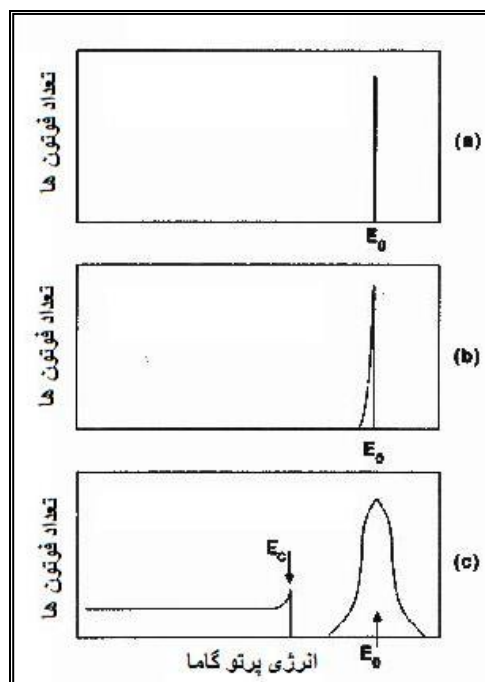
$$E \geq 1.022 \text{ MeV} \quad 2-3-4-2$$

اگر انرژی گاما بیشتر یا مساوی با ۱.۰۲۲ مگا الکترون‌ولت باشد، گاما می‌تواند یک زوج الکترون-پوزیترون تولید کند و فرایند تولید زوج رخ می‌دهد و گاما بطور کامل جذب محیط می‌شود. در صورتی که زوج الکترون-پوزیترون زمانی که هنوز در بلور سوسوزن هستند انرژی جنبشی خود را بطور کامل از دست بدهند، تمام انرژی آن‌ها ذخیره می‌شود. اگر در طول حرکت، پوزیترون با یک الکترون دیگر خنثی شود دو پرتوی گاما هریک با انرژی ۰/۵۱۱ مگا الکترون‌ولت تولید می‌کند. با کم شدن انرژی پرتوی گاما، طبق توضیحات بخش (الف) یک و یا هردوی این پرتوها می‌توانند در محیط جذب شده یا از آن فرار کنند [۶،۳۷].

۲-۳-۵ آشکارسازی

حالت ایده‌آل یک طیف اشعه گامای تک‌انرژی ناشی از واپاشی یک هسته آزاد بصورت خط تیز در انرژی E_0 نشان داده می‌شود (شکل a). چون فوتون‌های اشعه گاما معمولاً از یک هسته گسیل نمی‌شوند بلکه از محیط مادی منتشر می‌شوند برخی از آن‌ها قبل از بیرون آمدن از نمونه‌ی پرتوزا دستخوش پراکندگی می‌شوند. این پراکندگی فوتون‌ها را با انرژی اندکی کمتر از E_0 رها می‌کند و طیف انرژی فوتون‌های گسیل شده از نمونه اندکی به انرژی‌های زیر E_0 پهن می‌شوند (شکل b). بزرگی این پهن شدگی قابل چشم‌پوشی است. وقتی پرتو گاما وارد محیط آشکارسازی می‌شود، بخشی از انرژی یا تمام آن را به یک الکترون اتمی می‌دهد و آن را از قید پیوند اتمی آزاد می‌کند. الکترون آزاد انرژی جنبشی خود را، در طی چندین برخورد به دیگر الکترون‌های اتمی در محیط آشکارسازی منتقل می‌کند.

اگر برخورد فوتوالکتریک رخ دهد تمام انرژی فوتون به الکترون منتقل شده و الکترون آزاد سبب چندین یونش پی‌درپی می‌شود تا اینکه انرژی‌اش پایان یابد. بار تولید شده متناسب با انرژی واقعی فوتون است. اگر برخورد کامپتون رخ دهد بخشی از انرژی فوتون به الکترون منتقل شده و الکترون آزاد سبب چندین یونیزاسیون می‌شود تا اینکه انرژی‌اش پایان یابد. بار تولید شده متناسب با بخشی از انرژی است که در ابتدا از فوتون گرفته شده و اطلاعات مفیدی راجع به انرژی واقعی فوتون نمی‌دهد (شکل c). بر سیگنال این اساس نتیجه می‌گیریم سیگنال‌های تولید شده از پراکندگی کامپتون کوچکتر از سیگنال‌های پیک تمام انرژی هستند [۶،۳۸].

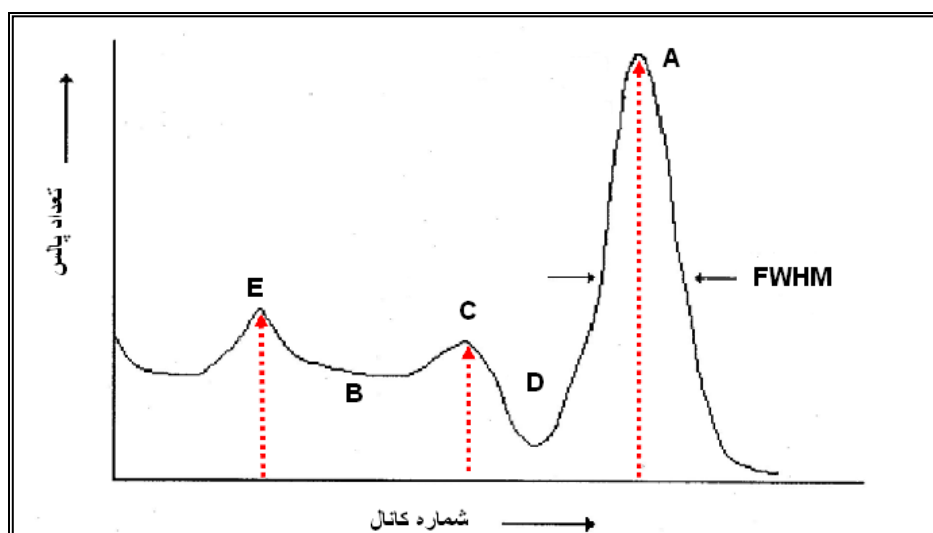


شکل ۲-۹ طیف اشعه گامای تک انرژی. (a) فوتون ناشی از واپاشی یک هسته‌ی آزاد. (b) فوتون ناشی از برهم-کنش در محیط مادی. (c) فوتون ناشی از برهم-کنش در آشکارساز [۳۸].

۲-۳-۵-۱ تفسیر طیف خروجی از فرایند آشکارسازی

طیف اشعه گامای تک انرژی که از فرایند آشکارسازی حاصل می‌شود، طرحی شبیه به شکل ۲-

۱۰ دارد و شامل بخش‌های زیر است



شکل ۲-۱۰ بخش‌های مختلف طیف پرتو گامای نوعی تک انرژی [۳۸].

A. پیک تمام انرژی یا فوتوپیک^۱: تپ‌های ناشی از برهم‌کنش فوتوالکتریک و برخی تپ‌های ناشی از برهم‌کنش‌های کامپتون یگانه یا چندگانه که در پی آن‌ها فوتوالکتریک رخ می‌دهد، تقریباً تمام انرژی خود را در محیط ذخیره کرده و عامل تولید این تپ هستند.

B. پیوستار کامپتون^۲: برهم‌کنش‌های کامپتون که بخشی از انرژی خود را در گستره‌ای از E تا C به محیط می‌دهند، عامل تشکیل این ناحیه هستند.

C. لبه‌ی کامپتون^۳: ناشی از برهم‌کنش کامپتون در $\theta = 180^\circ$ که انرژی متناظر با الکترون پراکنده،

$$T_e = T_{\max} = \frac{2\alpha h\nu}{1+2\alpha}$$
ذخیره می‌شود.

D. دره کامپتون^۴: برای یک چشمه‌ی تک انرژی، این بخش ناشی از برهم‌کنش تمام انرژی کامپتون فوتون‌ها تحت زوایای کوچک قبل از ورود به آشکارساز است.

E. پیک پس‌پراکندگی^۵: گاهی پرتوی گاما در اثر برهم‌کنش کامپتون در خارج از آشکارساز یا در حفاظ اطراف آن رخ می‌دهد. در این حالت تنها گامای پراکنده بدلیل برد زیاد وارد محیط

آشکارسازی شده و انرژی آن، $E_{\gamma'} = E_{\gamma', \min} = \frac{mc^2}{2+1/\alpha}$ ، در آشکارساز ذخیره می‌شود [۶،۳۸].

۲-۳-۶ آشکارسازها

قسمت اصلی هر دستگاه طیف‌نگاری پرتوهای گاما، آشکارساز آن است. اصول اساسی کار اغلب دستگاه‌های آشکارسازهای تابش‌های هسته‌ای مشابه است؛ تابش وارد آشکارساز می‌شود، با اتم‌های ماده‌ی

^۱ Full-Energy Photopeak

^۲ Continuum Compton

^۳ Compton Edge

^۴ Compton Valley

^۵ Backscatter Peak

آشکارساز برهم‌کنش می‌کند و ذره‌ی ورودی بخشی از انرژی خود را صرف جداسازی الکترون‌های کم-انرژی ماده‌ی آشکارساز از مدارهای اتمی خود می‌کند. این الکترون‌ها و یونش ایجاد شده جمع‌آوری می‌شوند و توسط یک مدار الکترونیکی به صورت یک تپ ولتاژ یا جریان درمی‌آیند. آشکارسازهای تابش-های هسته‌ای یکی از مهم‌ترین ابزار اندازه‌گیری در فیزیک هسته‌ای تجربی هستند. این ابزار متناسب با روش آشکارسازی به انواع مختلفی از قبیل آشکارسازهای گازی، سوسوزن‌ها، نیم‌رساناهای جامد و غیره طبقه‌بندی می‌شوند.

۲-۳-۶-۱ آشکارسازهای گازی

کارکرد بسیاری از آشکارسازهای تابش هسته‌ای مبتنی بر استفاده از یک میدان الکتریکی برای جداسازی و شمارش یون‌های (یا الکترون‌های) تشکیل شده در اثر عبور تابش از آشکارساز است. ساده‌ترین آشکارسازی که این عمل را انجام می‌دهد اتاقک یونش است که می‌توانیم آن را خازنی با صفحات موازی تلقی کنیم که ناحیه‌ی بین صفحات آن از گازی که معمولاً هواست، پر شده است. معمولاً چنین شمارنده-ای دارای دو الکتروود است که بین آن‌ها یک پتانسیل الکتریکی برقرار می‌شود. تابش یوننده با عبور از فضای بین الکتروودها، تمام یا بخشی از انرژی خود را با تولید زوج‌های یون-الکترون از دست می‌دهد. هم الکترون‌ها و هم یون‌ها حامل‌های باری هستند که تحت تاثیر میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. حرکت آن‌ها جریانی در الکتروودها القاء می‌کند که می‌توان آن را اندازه گرفت یا با استفاده از یک الکترونیک مناسب، بار تولید شده از تابش را تبدیل به یک تپ کرد که در این صورت تک تک ذرات را می‌توان شمرد [۳۶، ۱۰، ۶].

۲-۳-۶-۲ آشکارسازهای سوسوزن

آشکارسازی تابش یوننده به وسیله‌ی فرآیند سوسوزنی، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های در دسترس برای آشکارسازی و طیف‌نگاری دسته‌ی وسیعی از تابش‌ها است و برای پاسخ‌گویی به نیاز وسایل طیف‌سنجی هسته‌ای با بازده زیاد و قدرت تفکیک قابل قبول، شمارش‌گرهای سوسوزن در سال‌های دهه‌ی ۱۹۵۰

ساخته شدند و مورد استفاده قرار گرفتند. سوسوزن‌ها موادی هستند - جامد، مایع، گاز - که وقتی تابش یوننده از آنها می‌گذرد تولید جرقه یا نور می‌کنند. نخستین جامدی که به عنوان یک آشکارساز ذره به کار رفت سوسوزنی بود که راترفورد در سال ۱۹۱۰ در آزمایش‌های خود در زمینه‌ی پراکندگی ذرات آلفا مورد استفاده قرار داد. در وسیله‌ی مورد استفاده‌ی او، ذرات آلفا به یک صفحه‌ی سولفور روی برآمده و تولید نور می‌کردند.

مقدار نوری که در سوسوزن تولید می‌شود بسیار اندک است و پیش از اینکه بتوان آن را به صورت یک تپ یا هر روش دیگری انگاشت باید تقویت شود. تقویت یا تکثیر نور سوسوزن با وسیله‌ای به نام تکثیرکننده‌ی فوتونی^۱ صورت می‌گیرد. این سوسوزن‌ها را می‌توان به سه گروه سوسوزن‌های آلی، غیر آلی و گازی تقسیم‌بندی کرد [۳۶، ۱۰، ۶].

۲-۳-۶-۳ آشکارسازهای نیمرسانا

آشکارسازهای نیمرسانا، وسیله‌های حالت - جامدی هستند که تقریباً مانند اتاقک‌های یونش کار می‌کنند. حامل‌های بار در نیمرساناها برخلاف شمارنده‌های گازی، الکترون و یون نیستند بلکه از الکترون و حفره تشکیل می‌شوند. مهم‌ترین برتری آشکارسازهای نیمرسانا در مقایسه با دیگر شمارنده‌های تابشی، قدرت تفکیک انرژی بسیار بالای آنها است: یعنی توانایی آنها در تفکیک انرژی ذرات از میان یک طیف چند - انرژی. امتیازهای دیگر عبارتند از:

- پاسخ خطی (ارتفاع تپ بر حسب انرژی ذره) در گستره‌ی وسیعی از انرژی
- بازده بالاتر به ازای یک ماده‌ی معین، به علت چگالی بالای ماده‌ی جامدی که در ساختمان آنها به کار می‌رود
- امکان ساختن آنها به شکل‌های هندسی خاص
- زمان خیزش سریع تپ (نسبت به شمارنده‌های گازی)

^۱ Phototube

- توانایی کار در خلأ

- حساس نبودن به میدان‌های مغناطیسی

در حال حاضر، کارسازترین آشکارسازهای نیم‌رسانا از سیلیسیوم و ژرمانیوم ساخته می‌شوند. براساس نوع اتصال الکتریکی داخل کریستال، شکل آن به یکی از دو شکل صفحه‌ای یا استوانه‌ای محدود می‌شود. به کریستال‌های استوانه‌ای که یک طرف آن‌ها بسته می‌شود، آشکارسازهای هم‌محور^۱ گفته می‌شود و کریستال‌هایی که به شکل صفحه‌ای ساخته شده‌اند، مسطح^۲ نامیده می‌شوند [۳۶، ۱۰، ۶].

^۱ Coaxial

^۲ Planar

فصل سوم:

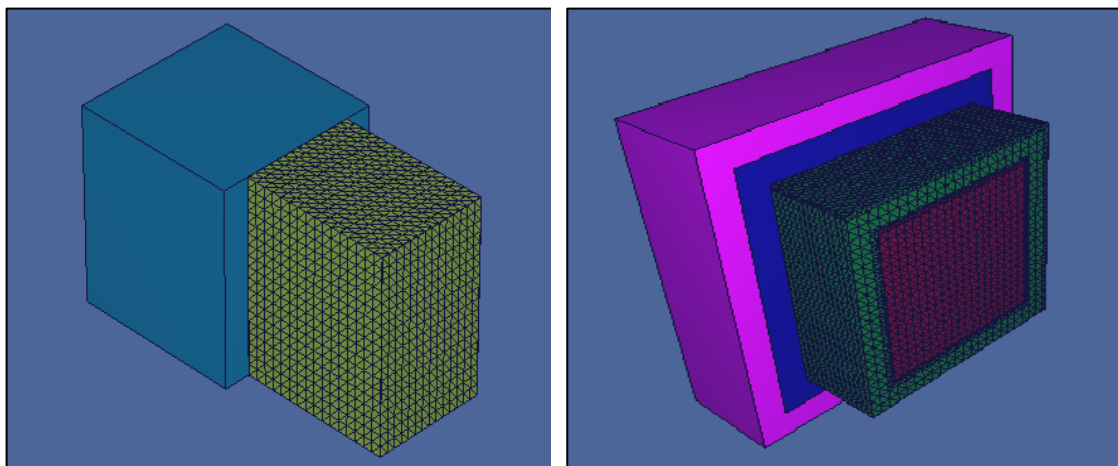
مواد و روش‌ها

۱-۳ کد MCNP

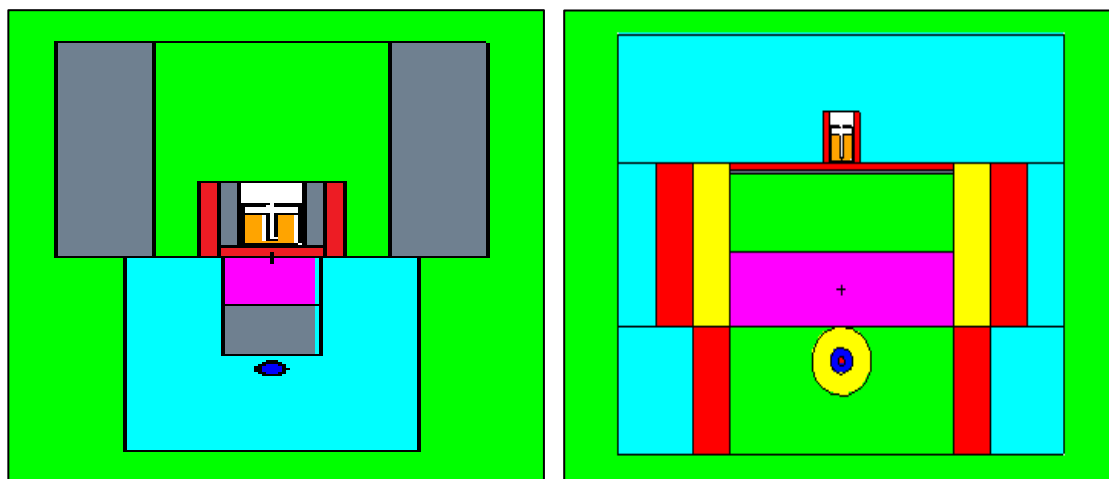
MCNP یک کد عمومی و توانا برای محاسبات ترابرد نوترون، فوتون و الکترون به روش مونت کارلو است. این کد تقریباً برای هر هندسه‌ای قابل تعریف است. در این کد محاسباتی، مدهای مختلف ترابرد شامل نوترون، فوتون، الکترون، ترکیبی از نوترون-فوتون (که در آن فوتون‌ها از برهم‌کنش نوترون‌ها با ماده‌ی مسیر آفریده می‌شوند)، نوترون-فوتون-الکترون و الکترون-فوتون قابل محاسبه هستند. در این کد، محدوده‌ی انرژی قابل تعریف برای نوترون از 10^{-10} تا ۲۰ مگا الکترون‌ولت (برای برخی عناصر تا ۳۰۰ مگا الکترون‌ولت) و برای فوتون‌ها و الکترون‌ها از ۱ کیلوالکترون‌ولت تا ۱۰۰۰ مگا الکترون‌ولت است [۳۹].

برای استفاده از کد MCNP باید یک فایل ورودی تولید شود. این فایل شامل اطلاعاتی در مورد هندسه و ترکیبات مساله است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از

۱. هندسه‌ی مساله شامل سطوح و سلول‌ها
 ۲. معرفی مواد و سطح مقطع‌های مورد نیاز
 ۳. چشمه، پارامترها و انرژی آن
 ۴. پاسخ یا تالی موردنظر
 ۵. تعداد ذراتی که بررسی تاریخچه‌ی آن‌ها مد نظر است.
- به‌منظور بررسی طیف پرتوهای گامای حاصل از PGNAA جهت آنالیز عنصری، شبیه‌سازی با استفاده از کد محاسباتی مونت‌کارلو صورت گرفت. برای این کار ابتدا فایل ورودی MCNP نوشته شد که طرح کلی آن در ادامه آمده است.



شکل ۳-۱: طرح سه بعدی از هندسه‌ی کلی مساله



شکل ۳-۲: طرح دو بعدی از هندسه‌ی کلی مساله

همان‌طور که در بالا بیان شد، این فایل شامل بخش‌های متفاوتی است از جمله معرفی سلول‌ها، سطوح، نوع چشمه و مشخصات آن، مواد تشکیل دهنده‌ی سلول‌ها، تالی‌ها یا همان نتایج‌ی که از اجرای کد MCNP خواستار به‌دست آوردن آن‌ها هستیم و تعداد ذراتی که تاریخچه‌ی آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قطعاتی که در فایل ورودی تعریف شده‌اند عبارتند از:

۳-۱-۱ نمونه‌ها

در این مطالعه ما سه نمونه‌ی مختلف را جهت آنالیز مورد بررسی قرار دادیم که در ادامه به شرح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم.

i. ZrO_2 ؛ زیرکونیم اکسید دارای بالاترین مقاومت به ضربه در بین سرامیک‌های پیشرفته را دارد. این دوام بالا، خواص شیمیایی و مکانیکی عالی، نقطه ذوب بالا و مقاومت در برابر خوردگی آن را برای کاربردهای پزشکی، استفاده به‌عنوان یک عایق حرارتی و یک نسوز مناسب، صنایع الکتریکی و الکترونیکی، پیل سوختی و شیشه و لعاب (به‌دلیل مقاومت بسیار بالا در برابر محیط‌های قلیایی) ایده‌آل می‌سازد. همچنین به‌خاطر داشتن سطحی با اصطکاک کم و حداقل جذب نوترون‌های فرودی به آن، به‌عنوان بازتابنده در راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ii. B_4C ؛ سرامیک‌های ساخته شده از کاربید بور به‌دلیل دارا بودن خواص منحصربه‌فردی همچون سختی فوق‌العاده بالا، مقاومت پوششی عالی، نقطه‌ی ذوب بالا، دانسیته‌ی پایین، پتانسیل بالایی برای بسیاری از کاربردهای ساختاری در دمای اتاق و درجه حرارت‌های بالا دارند. از مهم‌ترین کاربردهای این دسته از سرامیک‌ها می‌توان به‌عنوان ساینده‌ها، ابزارهای برشی، زره‌های سرامیکی، سوخت جامد موشک، همراه با گرافیت به‌عنوان ترموکوپل برای اندازه‌گیری دماهای بالا، صنایع هسته‌ای (به‌خاطر سطح مقطع جذب بالای نوترون) و غیره نام برد.

iii. Si_3N_4 ؛ سیلیکون نیتريد، بهترین ترکیب از خواص الکتریکی، مکانیکی و گرمایی را در مواد سرامیکی دارد که یک سرامیک نیتروژنی با کاربردهای وسیع می‌باشد. یک ماده‌ی سرامیکی ایده‌آل است زیرا به‌منظور پدید آوردن کرنش در این ماده، نیاز به اعمال تنش بسیار بالایی است. این دسته سرامیک‌ها دارای استحکام پیوند بالا، مقاومت به شوک حرارتی خوب (به‌دلیل ضریب انبساط حرارتی پایین)، مقاومت در برابر اکسیداسیون، خاصیت تحمل عالی در دماهای زیاد و پایداری شیمیایی می‌باشند که استفاده از آن‌ها را در ابزار برش، جوش‌کاری، مخازن فشار برای راکتورهای هسته‌ای، موتورهای جت گازی، مواد دیرگداز و غیره فراهم می‌سازد [۳۱،۴۰].

در جدول زیر ترکیبات نمونه‌های موردنظر فهرست شده‌اند.

جدول ۳-۱: ترکیبات و درصد وزنی زیرکونیوم اکسید { ZrO_2 ($\rho = 6.04 \text{ gr/cm}^3$) }	
ترکیبات	درصد وزنی
^{90}Zr	۰/۳۸۰
^{91}Zr	۰/۰۸۳
^{92}Zr	۰/۱۲۷
^{94}Zr	۰/۱۲۹
^{96}Zr	۰/۰۲۱
^{16}O	۰/۲۶۰

جدول ۳-۲: ترکیبات و درصد وزنی کاربید بور { B_4C ($\rho = 2.52 \text{ gr/cm}^3$) }	
ترکیبات	درصد وزنی
^{10}B	۰/۱۵۶
^{11}B	۰/۶۲۷
^{12}C	۰/۲۱۵
^{13}C	۰/۰۰۲

جدول ۳-۳: ترکیبات و درصد وزنی سیلیکون نیتريد { Si_3N_4 ($\rho = 3.31 \text{ gr/cm}^3$) }	
ترکیبات	درصد وزنی
^{28}Si	۰/۵۵۴
^{29}Si	۰/۰۲۸
^{30}Si	۰/۰۱۹
^{14}N	۰/۳۹۸
^{15}N	۰/۰۰۱

۲-۱-۳ چشمه‌های نوترونی

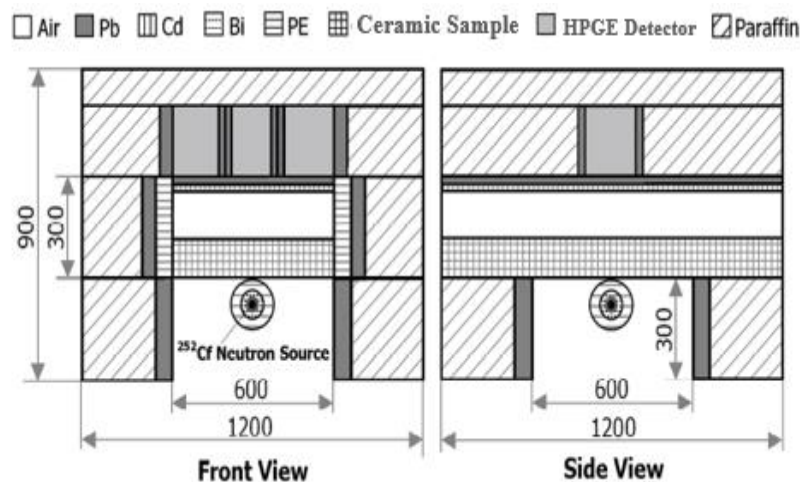
^{252}Cf و $^{241}Am-Be$ ، دو چشمه‌ی نوترونی مورد استفاده در این کار می‌باشند که در ادامه به توضیح

مختصری از هر کدام می‌پردازیم.

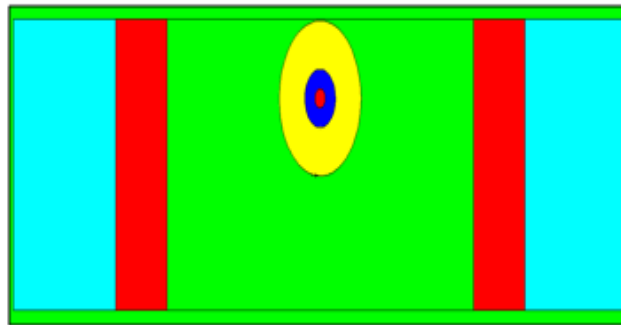
i. ^{252}Cf چشمه‌ی شکافت خودبه‌خودی ^{252}Cf با میانگین انرژی $2/3$ مگاالکترون‌ولت می‌باشد که برای جذب پرتوهای گامای گسیل شده از این چشمه، درون کره‌ای سربی به شعاع ۱ سانتی‌متر قرار گرفته‌است. این چشمه با نیمه‌عمر $2/64$ سال با آهنگ $(s^{-1}g^{-1}) 10^{12} \times 2/3$ واپاشی می‌کند و طیف آن با استفاده از توزیع ماکسول

$$f(E) = CE^{1/2}e^{-E/\alpha}$$

شبیه‌سازی می‌شود که در آن E ، انرژی نوترون، $1/42$ مگاالکترون‌ولت $\alpha =$ و C یک ثابت است. پرتوهای گاما با انرژی و شدت مشخصه توسط چشمه‌ی ^{252}Cf منتشر می‌شوند. برای کاهش اثر پرتوهای گاما در PGNAA، از سرب و بیسموت به‌خاطر شار پایین پرتوهای گاما به‌عنوان حفاظ نوترونی استفاده شده‌است. برای به‌دست آوردن دقت بیشتر در آنالیز PGNAA، شار نوترون گرمایی باید بیشینه باشد و شار نوترون سریع، کمینه. بنابراین کندکردن نوترون‌های سریع به نوترون‌های گرمایی از طریق یک ماده‌ی کندکننده، نقشی تعیین‌کننده دارد. نوترون‌ها توسط کندکننده جذب می‌شوند، در نتیجه یک کندکننده‌ی خوب باید قابلیت کندکنندگی بالایی داشته باشد که اینجا از پلی‌اتیلن به‌عنوان کندکننده‌ی مناسب استفاده شده‌است. فاصله‌ی بهینه‌ی چشمه تا نمونه با در نظر گرفتن بالاترین مقدار شار نوترون-های حرارتی، فوق‌حرارتی و تند و همچنین با توجه به اینکه شار نوترون با افزایش فاصله‌ی نمونه از چشمه به مقدار کمی افزایش می‌یابد، ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۴۱].

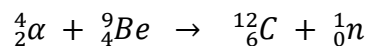


■ Pb ■ Bi ■ PE ■ Air ■ Paraffin



شکل ۳-۳: هندسه‌ی شبیه‌سازی شده‌ی چشمه‌ی ^{252}Cf [۴۱]

ii. $^{241}\text{Am-Be}$ ؛ چشمه‌ی رادیوایزوتوپی $^{241}\text{Am-Be}$ ، یکی از مهم‌ترین چشمه‌های نوترونی است که کاربردهای فراوانی در پزشکی، صنعت و تحقیقات علمی دارد. این چشمه دارای نیمه‌عمر بالایی در حدود ۴۳۲/۷ سال است. یک چنین نیمه‌عمری امکان کاربرد طولانی این چشمه با شار پایدار را فراهم می‌کند. ^{241}Am یک گسیلنده‌ی قوی آلفاست و ^9Be دارای یک نوترون مقید نسبتا سست است (با انرژی بستگی ۱/۷ مگا الکترون‌ولت). بنابراین هرگاه یک ذره‌ی حاصل از واپاشی پرتوزا (۵-۶ مگا الکترون‌ولت) به هسته‌ی ^9Be برخورد کند، نوترونی توسط برهم‌کنش زیر می‌تواند آزاد شود:

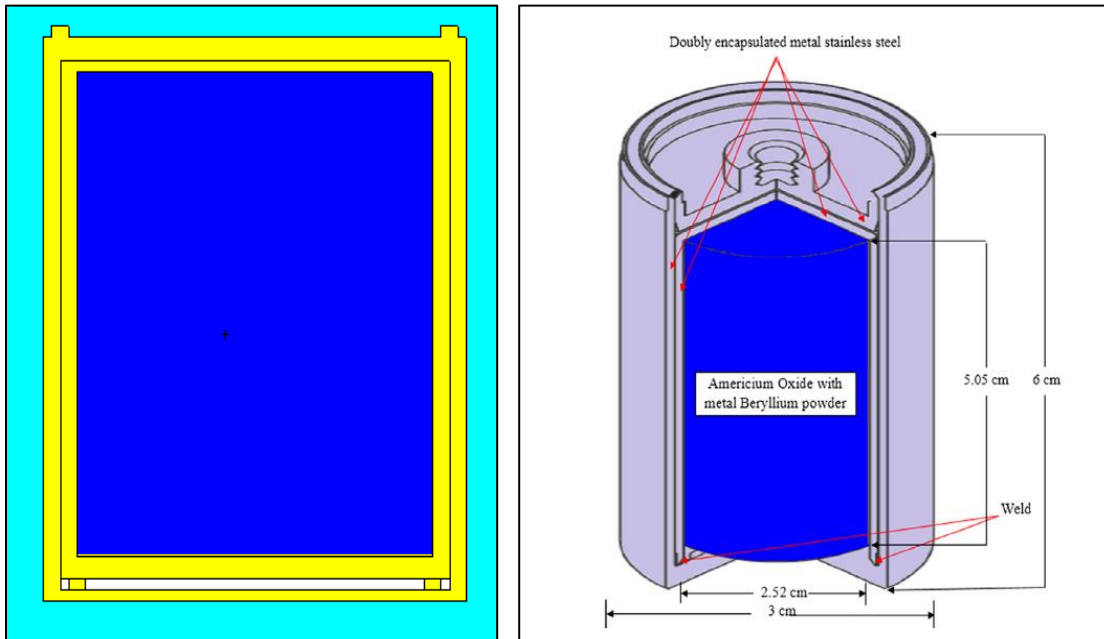


مقدار Q برای این واکنش برابر ۵/۷ مگا الکترون‌ولت است. نوترون‌های سریع تولید شده توسط این چشمه دارای انرژی متوسط ۴/۵ مگا الکترون‌ولت و بیشینه‌ی انرژی ۱۱ مگا الکترون‌ولت هستند. این چشمه علاوه بر نوترون، پرتوی گاما نیز تولید می‌کند.

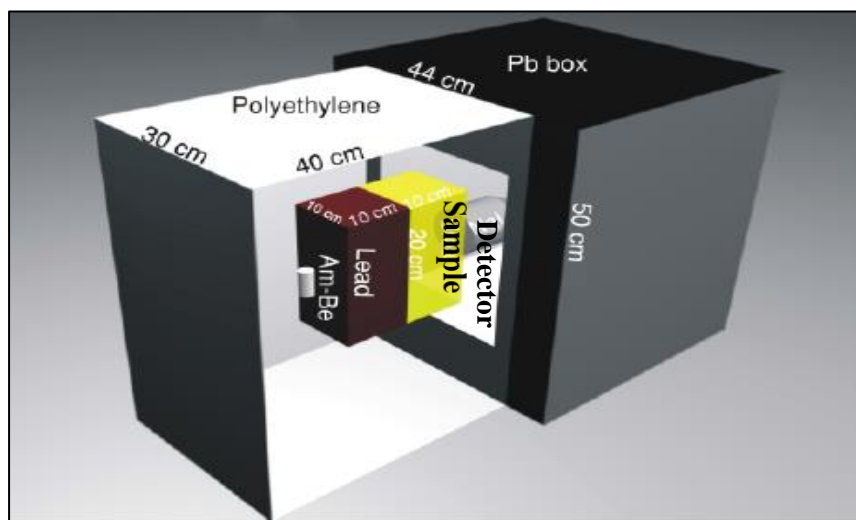
چشمه‌ی مورد استفاده در این کار با فعالیت ۵ کوری (۱۸۵ گیگا بکرل) به شکل کپسول X.14 (code AMN.24) که به صورت یک استوانه به قطر ۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۶ سانتی‌متر تعریف شده که در شکل زیر نشان داده شده است. گسیل نوترون از چشمه حدود 2×10^6 نوترون بر ثانیه در کوری با دامنه‌ی

تغییرات ۱۰ درصد و قدرت $1/1 \times 10^6$ نوترون بر ثانیه است. چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ به صورت ترکیبی از اکسید امرسیوم و پودر فلزی بریلیوم است که درون محفظه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ قرار دارد که درصد ترکیبات آن عبارت است از: C (%/۰/۰۰۴)، Mn (%/۰/۱/۵۹)، P (%/۰/۰/۱۱)، S (%/۰/۰/۰۰۸)، Si (%/۰/۱۶/۹۶)، Cr (%/۰/۲/۲۹)، Mo (%/۰/۶۵/۱۵۷)، Fe (%/۰/۶۵/۱۵۷). برای به دست آوردن ماکزیمم بهره در طیف پرتوهای گامای آنی حاصل، ارتفاع بهینه‌ی کندکننده و همچنین مکان بهینه‌ی چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ درون کندکننده در نظر گرفته شد. مکان بهینه وقتی به دست آمد که بالاترین تعداد برخورد بین نوترون-های گرمایی و نمونه را داشته باشیم. این هندسه شامل یک نمونه‌ی مکعبی ($10 \times 10 \times 20$ سانتی‌متر مکعب) و یک حفاظ سربی مکعب شکل ($10 \times 10 \times 20$ سانتی‌متر مکعب) است که درون یک مکعب مستطیل (با ابعاد $30 \times 40 \times 50$ سانتی‌متر مکعب) که با HDPE^۱ با چگالی $0/965$ گرم بر سانتی‌متر مکعب پر شده است، قرار گرفته‌اند. نمونه بین آشکارساز و حفاظ سربی قرار دارد. علاوه بر این، نقش گیراندازی نوترون در حفاظ نوترونی برای آشکارساز پرتوی گاما در طیف نهایی پرتوهای گاما باید در نظر گرفته شود. نوع حفاظ‌ها به انرژی نوترون بستگی دارد. برای جذب نوترون‌های گرمایی، ترکیبات بور به شدت موثر هستند که در اینجا از اسید بوریک (H_3BO_3) با چگالی $0/89$ گرم بر سانتی‌متر مکعب به عنوان ماده‌ی حفاظ آشکارساز استفاده شده است [۴۴-۴۱].

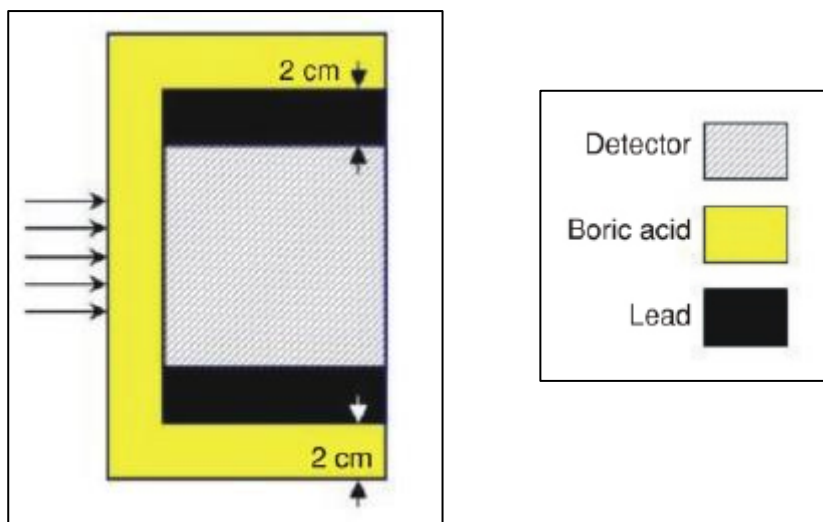
^۱ High Density Polyethylene



شکل ۳-۴: طرح کلی چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ [۴۲] و هندسه‌ی شبیه‌سازی شده



شکل ۳-۵: طرح کلی هندسه‌ی شبیه‌سازی شده با چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ [۴۳]



شکل ۳-۶: طرح حفاظ آشکارساز با استفاده از اسیدبوریک و سرب [۴۳]

۳-۱-۳ آشکارسازها

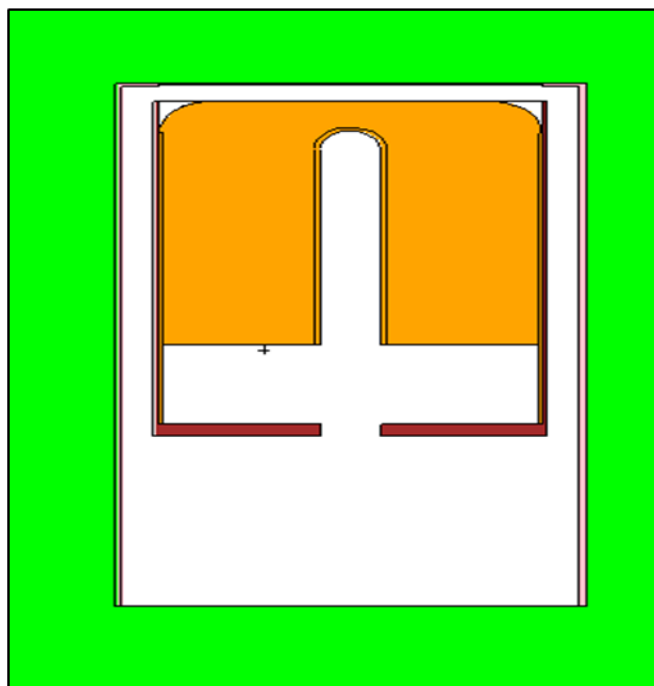
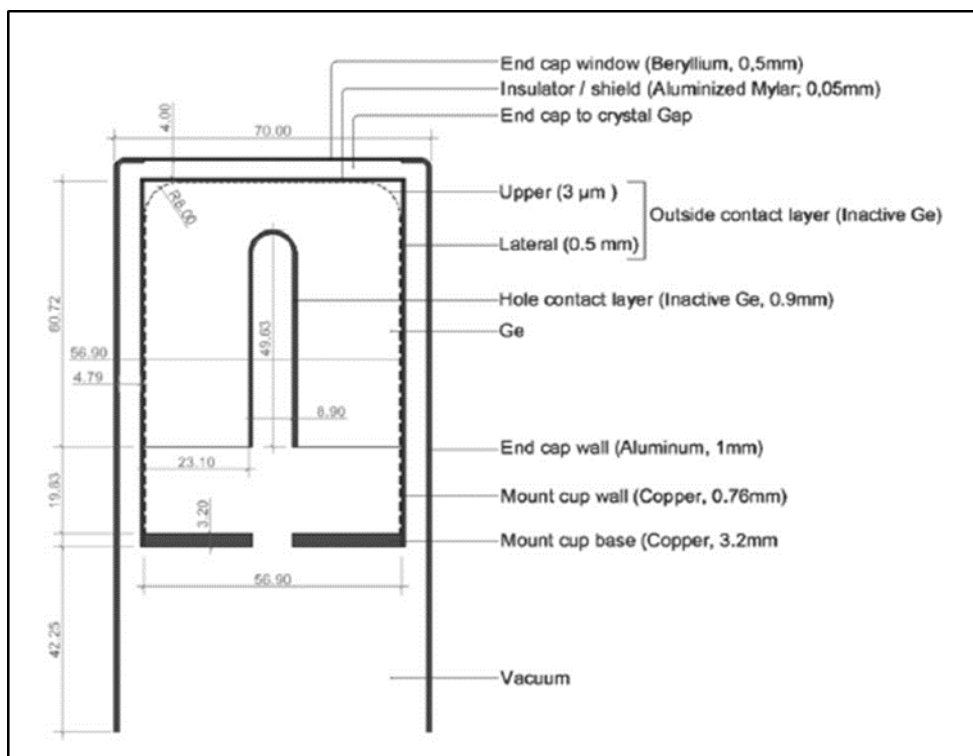
همچنین برای مقایسه‌ی بهتر نتایج، شبیه‌سازی‌ها با آشکارساز HPGe انجام شده‌اند که در جهت $+y$ قرار گرفته‌اند. در ادامه به توضیح مختصری درباره‌ی مشخصات آن می‌پردازیم.

- HPGe ؛ برای شبیه‌سازی آشکارساز، داشتن مشخصات کامل آن به‌منظور طراحی مدل آن و

استفاده در کد مونت کارلو ضروری است. آشکارساز HPGe مورد استفاده در این بررسی از نوع

n و مدل ORTEC GMX45 با بازده نسبی ۵۲/۵٪ و قدرت تفکیک ۱/۹ کیلوالکترون‌ولت (

برای فوتون‌های ^{60}Co با انرژی ۱۳۳۲/۵ کیلوالکترون‌ولت) است [۴۵].



شکل ۳-۷: طرح کلی آشکارساز HPGe [۴۵] و هندسه‌ی شبیه‌سازی شده

فصل چهارم:

نتایج و بحث

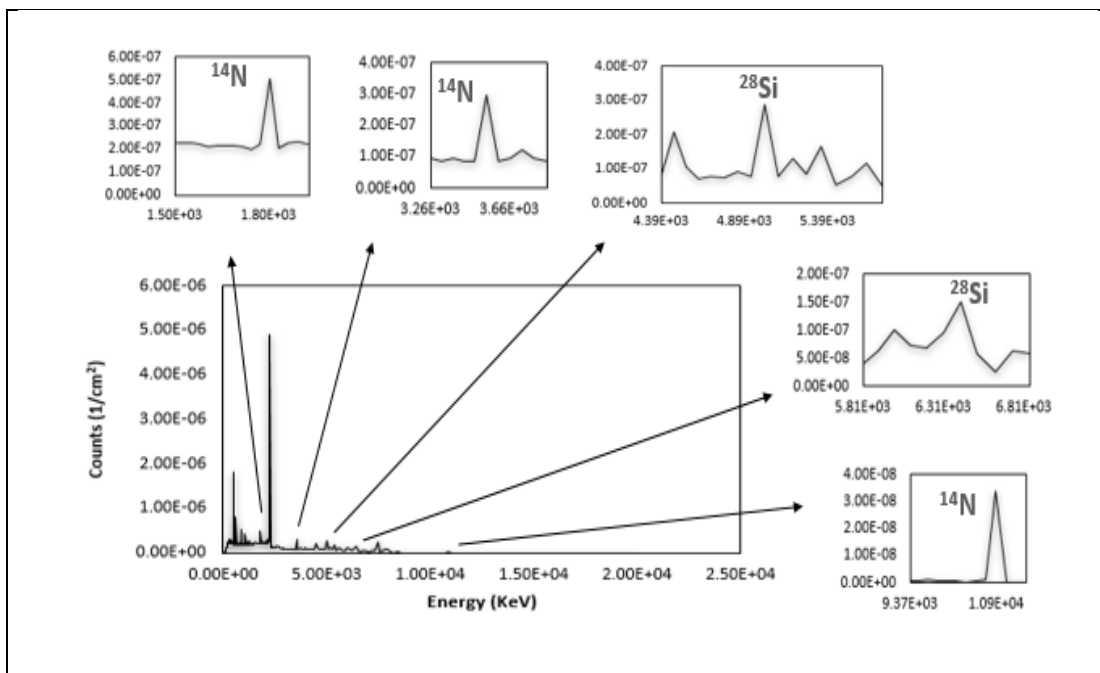
۱-۴ مقدمه

همانطور که پیش از این بیان شد، هدف از پژوهش حاضر آنالیز عنصری نمونه‌های سرامیکی با استفاده از تحلیل به روش فعال‌سازی نوترونی گامای آنی است.

از تالی F4 برای محاسبه شار عبوری یک ذره از سلول و همچنین کارت En (که n شماره‌ی وابسته به تالی F4) برای به‌دست آوردن مقدار تالی برحسب انرژی استفاده شده‌است. برای به‌دست آوردن نتایج بهتر از پنج بازه‌ی انرژی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ در برنامه استفاده کردیم و پس از اجرای برنامه و مقایسه‌ی خروجی‌ها، در نهایت بازه‌ی ۶۰۰ قسمتی به‌دلیل خطای کمتر و بهتر نشان دادن قله‌ها انتخاب شد. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای هر سه نمونه و در حالت‌های مختلف از جمله استفاده از چشمه‌های نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf و همچنین آشکارساز HPGe به‌صورت نمودارهایی ارائه شده است. در پایان نیز برای مقایسه‌ی بهتر، نتایج مقادیر تجربی و محاسباتی به‌صورت جداولی فهرست شده‌اند.

۲-۴ تحلیل نتایج

- Si_3N_4 ؛ طیف گامای حاصل از پرتودهی این نمونه توسط دو چشمه‌ی ذکر شده و همین‌طور آشکارساز به‌کار برده به‌دست آمد که نمودار آن در زیر آمده‌است.



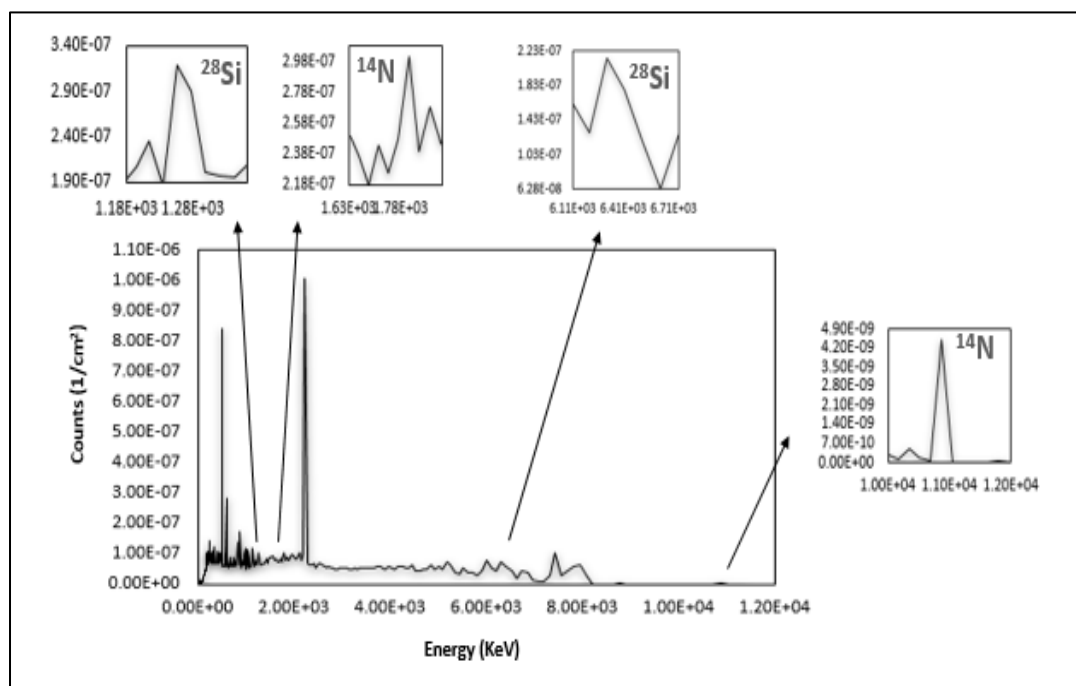
شکل ۴-۱: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله چشمه ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ، با استفاده از آشکارساز

HPGe

همان طور که می دانیم بیشتر پرتوهای گاما از گیراندازی نوترون های حرارتی تولید می شوند. اگرچه نوترون های سریع نیز می توانند جذب شوند ولی احتمال جذب نوترون های حرارتی به مراتب بیشتر است. بنابراین هرچه متوسط انرژی چشمه ی نوترون پایین تر باشد شار نوترون های حرارتی افزایش یافته و به این ترتیب بازدهی چشمه برای تولید پرتوهای گامای آنی ناشی از گیراندازی نوترون های حرارتی افزایش خواهد یافت. چون چشمه های (α, n) مانند $^{241}\text{Am-Be}$ ، در مقایسه با چشمه های (f, n) مثل ^{252}Cf انرژی بالاتری دارند، لذا بازدهی کمتری برای تولید پرتوهای گامای ناشی از گیراندازی نوترون های حرارتی دارند ولی با توجه به انرژی متوسط $4-4/5$ مگا الکترون ولتی، بازدهی آنها برای تولید پرتوهای گامای آنی ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترون بالاست.

قله های سیلیسیم و نیتروژن موجود در نمونه مشخص شدند و برای حالتی که از چشمه ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ استفاده کردیم، به ترتیب انرژی های 6415 ، 5010 کیلو الکترون ولت برای سیلیسیم و 1800 ، 3544 و 10870 کیلو الکترون ولت برای نیتروژن حاصل از واکنش (n, γ) مشاهده کردیم.

همچنین از جمله ساختارهای برجسته‌ی به‌دست آمده در طیف عبارتند از قله‌ی مربوط به نابودی زوج با انرژی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت که قابل مشاهده بود. گامای ناشی از پراکندگی ناکشسان کربن در انرژی ۴۴۶۴ کیلوالکترون‌ولت و پیک تیز هیدروژن مربوط به گیراندازی نوترون‌های حرارتی در انرژی ۲۲۳۰ کیلو الکترون‌ولت را داریم به‌خوبی قابل مشاهده می‌باشد. علاوه براین شاهد حضور قله‌هایی در انرژی‌های ۵۹۸ و ۸۴۵ کیلو الکترون‌ولت به علت گیراندازی نوترون‌های گرمایی در ژرمانیوم مربوط به آشکارساز HPGe بودیم.



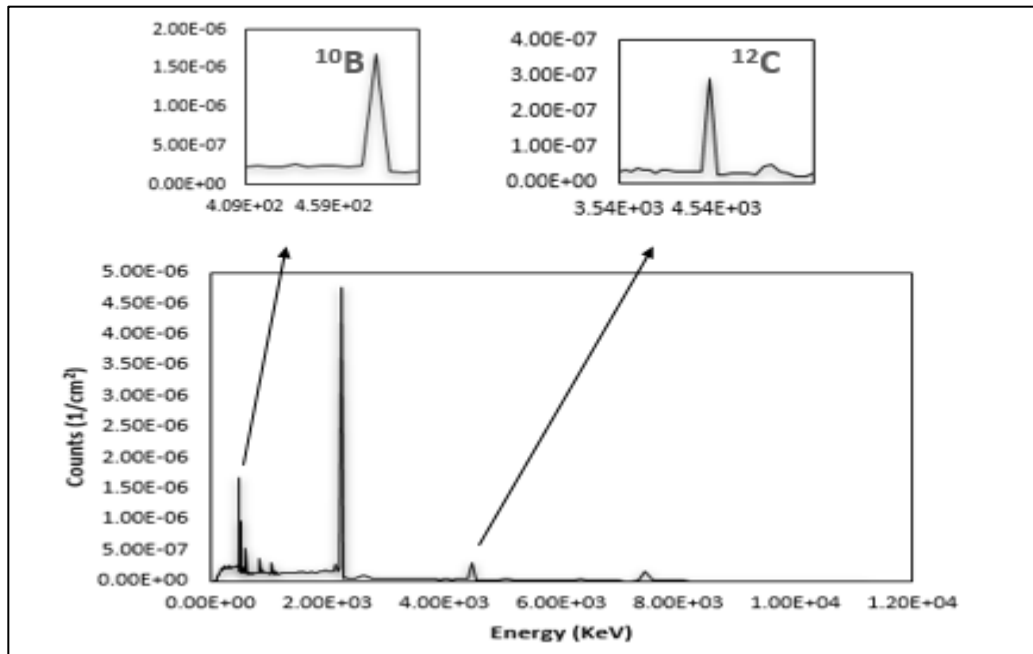
شکل ۲-۴: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به‌وسیله‌ی چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf ، با استفاده از آشکارسازهای

HPGe

برای چشمه‌ی ^{252}Cf با توجه به گیراندازی نوترون‌های حرارتی، به ترتیب انرژی‌های ۱۲۷۶ و ۶۴۱۵ کیلوالکترون‌ولت برای سیلیسیم و انرژی‌های ۱۸۰۰ و ۱۰۸۷۰ کیلوالکترون‌ولت برای نیتروژن را داشتیم. در این چشمه مانند چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ ، پیک‌های مربوط به نابودی زوج، پراکندگی ناکشسان کربن، گیراندازی نوترون حرارتی در هیدروژن، پیک‌های مرتبط با واکنش نوترون‌های حرارتی ژرمانیوم در سلول آشکارساز HPGe را داریم.

- B_4C ؛ طیف‌های مربوط به نمونه‌ی کاربید بور نیز مانند سیلیسیم نیتريد و براساس نوع

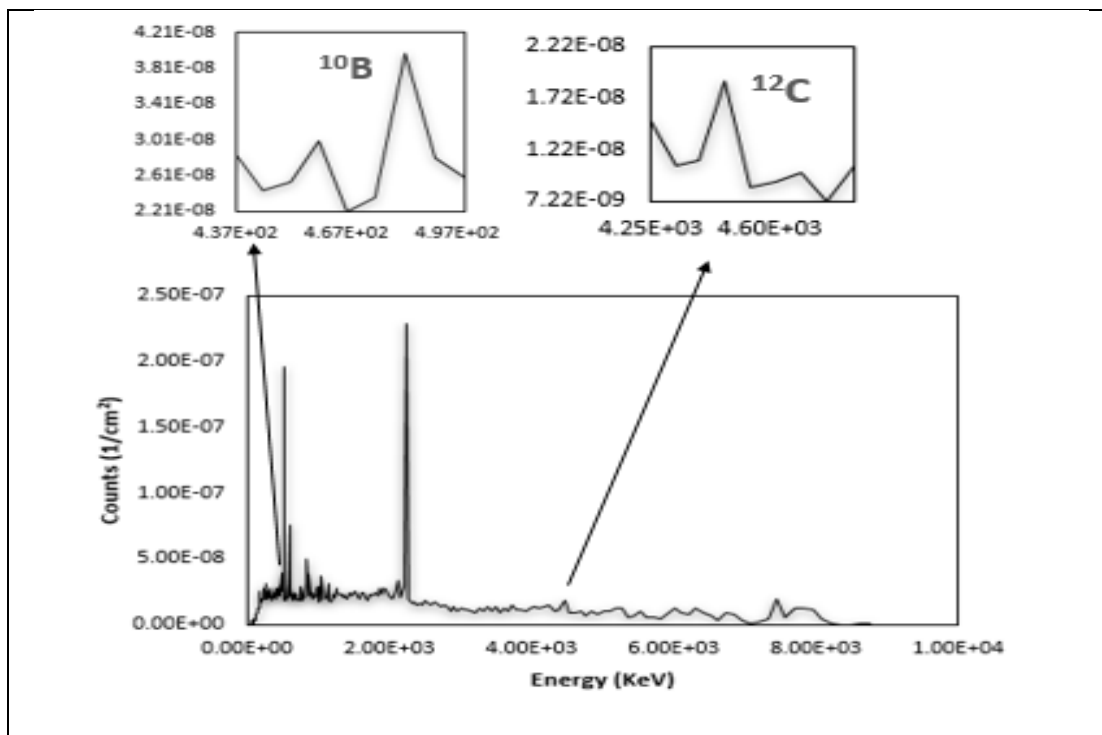
چشمه‌ها و آشکارساز مورد استفاده در ادامه قرار گرفتند.



شکل ۳-۴: طیف گامای حاصل از پرتودهی نمونه به وسیله‌ی چشمه‌ی نوترونی $^{241}Am-Be$ ، با استفاده از آشکارساز

HPGe

از مشخصه‌های اصلی طیف این نمونه وجود قله بسیار تیز در انرژی ۴۸۲ کیلوالکترون‌ولت مربوط به واکنش گیراندازی نوترونی بور، $^{10}B(n, \alpha\gamma)^7Li$ می‌باشد. برای کربن هم با توجه به سطح مقطع پایین گیراندازی نوترون‌های حرارتی، انرژی ۴۴۶۴ کیلوالکترون‌ولت مربوط به پراکندگی ناکشسان مشاهده شده است. پیک‌های مربوط به واکنش (n, γ) برای هیدروژن در انرژی ۲۲۳۰ و همین‌طور قله‌ی متناظر با نابودی زوج در انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت در این نمودار به خوبی دیده می‌شود. علاوه بر این شاهد حضور قله‌هایی مربوط به واکنش نوترون‌های حرارتی با ژرمانیوم در آشکارساز HPGe هستیم.

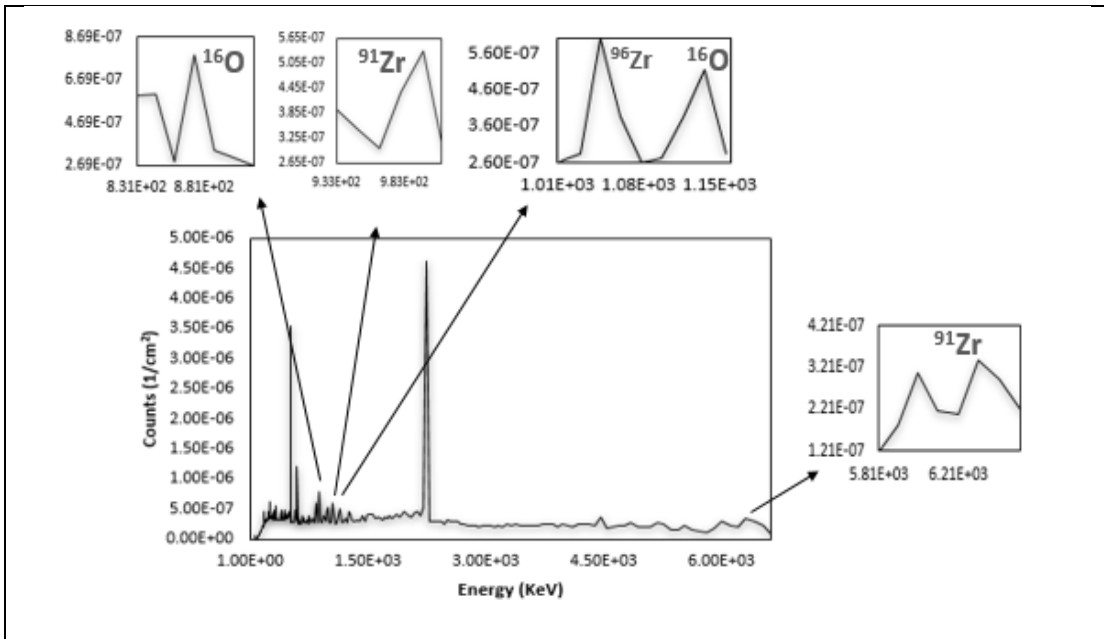


شکل ۴-۴: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله چشمه ی نوترونی ^{252}Cf ، با استفاده از آشکارساز

HPGe

در دو نمودار شکل ۴-۴، همانند نمودارهای شکل ۴-۳ ما قله های مربوط به پراکندگی ناکشسان کربن در انرژی ۴۴۶۴، گیراندازی نوترون حرارتی در بور و هیدروژن در انرژی های ۴۸۲ و ۲۲۳۰ و ژرمانیوم در سلول آشکارساز HPGe در انرژی های ۵۹۸ و ۸۴۵ کیلو الکترون ولت را داریم، همچنین حضور قله ی مربوط به نابودی زوج هم مانند نمودار قبل قابل مشاهده است.

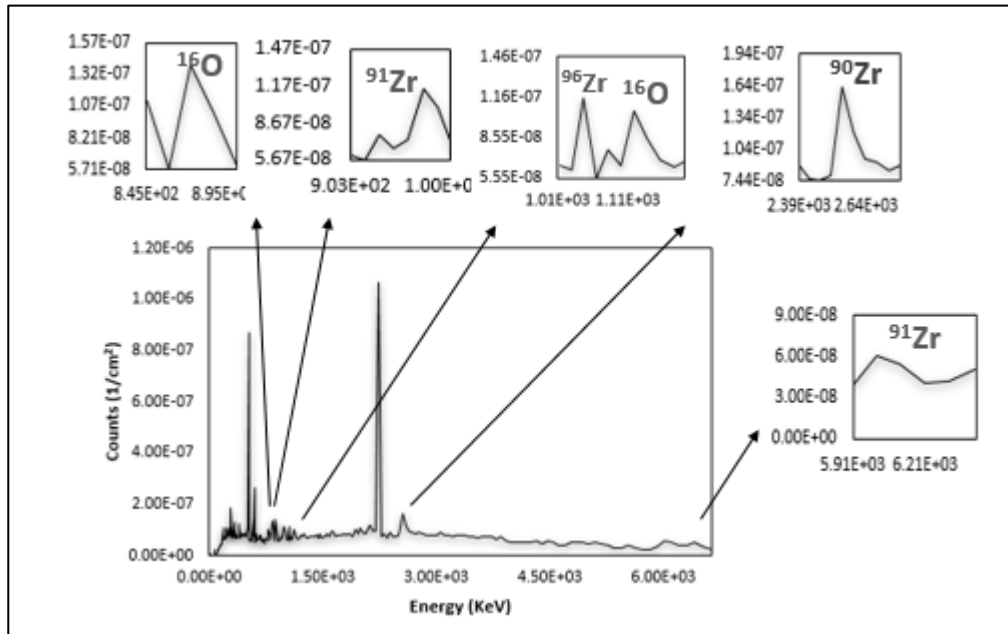
- ZrO_2 ؛ طیف های پرتو های گامای زیر کونیوم اکسید تحت پرتو دهی با چشمه های ذکر شده به شکل زیر است.



شکل ۴-۵: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ ، با استفاده از آشکارساز

HPGe

در شکل ۴-۵، برای اکسیژن به ترتیب قله‌هایی در انرژی‌های ۸۷۴ و ۱۱۴۰ کیلو الکترون‌ولت و برای زیرکونیوم در انرژی‌های ۹۹۷، ۱۰۵۰ و ۶۲۹۵ کیلو الکترون‌ولت دیده می‌شوند. انرژی ۴۴۶۴ کیلو الکترون‌ولت مربوط به پراکندگی ناکشسان نوترون در کربن، قله‌ی مربوط به نابودی زوج، گیراندازی نوترون‌های حرارتی در هیدروژن و همین‌طور قله‌های مربوط به فعال‌شدگی ژرمانیوم در سلول آشکارساز HPGe نیز در نمودار این نمونه دیده شده‌است.



شکل ۴-۶: طیف گامای حاصل از پرتو دهی نمونه به وسیله چشمه ی نوترونی ^{252}Cf ، با استفاده از آشکارساز

HPGe

در شکل ۴-۶، در انرژی های ۹۹۷، ۱۰۵۰، ۲۵۴۹ و ۶۲۹۵ کیلو الکترون ولت شاهد قله ی زیر کونیوم می باشیم و برای اکسیژن قله هایی در انرژی های ۸۷۴ و ۱۱۴۰ کیلو الکترون ولت وجود دارد. قله های مربوط به نابودی زوج، گیراندازی نوترون های حرارتی در هیدروژن، پراکندگی ناکشسان نوترون در کربن و همین طور قله های مربوط به فعال شدگی ژرمانیوم هم در این نمودار دیده می شوند.

۴-۳ مقایسه ی مقادیر تجربی و محاسباتی

همچنین در ادامه انرژی های به دست آمده از محاسبات در جدول های زیر فهرست شده اند.

جدول ۴-۱: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه سازی و تجربی سیلیکون نیتريد با استفاده از چشمه ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$			
ایزوتوپ	انرژی تجربی (KeV)	انرژی محاسبه شده (KeV)	خطا (درصد)
^{14}N	۱۸۸۴	۱۸۰۰	۴/۴۵
^{14}N	۵۲۶۹	۵۳۵۲	۱/۵۷
^{14}N	۱۰۸۲۹	۱۰۸۷۰	۰/۳۷۸

^{28}Si	۴۹۳۳	۵۰۱۰	۱/۵۶
^{28}Si	۶۳۷۹	۶۴۱۵	۰/۵۶۴

جدول ۲-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی سیلیکون نیتريد با استفاده از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf

ایزوتوپ	انرژی تجربی (KeV)	انرژی محاسبه شده (KeV)	خطا (درصد)
^{14}N	۱۸۸۴	۱۸۰۰	۴/۴۵
^{14}N	۱۰۸۲۹	۱۰۸۷۰	۰/۳۷۸
^{28}Si	۱۲۷۳	۱۲۷۶	۰/۲۳
^{28}Si	۶۳۷۹	۶۴۱۵	۰/۵۶۴

جدول ۳-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی کاربرد بور با استفاده از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf و $^{241}\text{Am-Be}$

ایزوتوپ	انرژی تجربی (KeV)	انرژی محاسبه شده (KeV)	آشکارساز	خطا (درصد)
کربن	۴۴۳۰	۴۴۶۴	NaI & HPGe	۰/۷۶۷۴
بور	۴۷۷	۴۸۲	NaI & HPGe	۱/۰۴۸۲

جدول ۴-۴: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی زیرکونیوم اکسید با استفاده از چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$

ایزوتوپ	انرژی تجربی (KeV)	انرژی محاسبه شده (KeV)	خطا (درصد)
^{16}O	۸۷۰	۸۷۴	۰/۴۵۹
^{16}O	۱۰۸۷	۱۱۴۰	۴/۸۷۵
^{91}Zr	۹۹۰	۹۹۷	۰/۷۰۷

^{91}Zr	۶۲۹۵	۶۳۱۰	۰/۲۳۸
^{96}Zr	۱۱۰۲	۱۰۵۰	۴/۷۱

جدول ۴-۵: پرتوهای گامای محاسبه شده در شبیه‌سازی و تجربی زیرکونیوم اکسید با استفاده از چشمه‌ی نوترونی ^{252}Cf

ایزوتوپ	انرژی تجربی (KeV)	انرژی محاسبه شده (KeV)	خطا (درصد)
^{16}O	۸۷۰	۸۷۴	۰/۴۵۹
^{16}O	۱۰۸۷	۱۱۴۰	۴/۸۷۵
^{91}Zr	۹۹۰	۹۹۷	۰/۷۰۷
^{91}Zr	۲۵۵۷	۲۵۴۹	۰/۳۱۲
^{91}Zr	۶۲۹۵	۶۳۱۰	۰/۲۳۸
^{96}Zr	۱۱۰۲	۱۰۵۰	۴/۷۱

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۵ نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش شد تا با انجام یک سری برنامه‌های شبیه‌سازی به روش مونت کارلو، تحقیقاتی بر روی آنالیز عنصری نمونه‌های سرامیکی ZrO_2 ، B_4C ، Si_3N_4 و ZrO_2 انجام شود. به منظور مقایسه‌ی بهتر، از سه چشمه‌ی نوترونی و دو آشکارساز متفاوت استفاده کردیم. طیف به‌دست آمده مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تجربی گاماها‌ی مشخصه‌ی ایزوتوپ‌های موجود در نمونه، مقایسه شدند. با محاسبه‌ی خطای بین دو مقدار ذکر شده، مشاهده می‌شود که سازگاری نسبتاً خوبی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد و می‌توان از این روش غیرمخرب جهت آنالیز نمونه‌های ناشناخته نیز استفاده کرد.

۲-۵ پیشنهادها

به منظور ادامه این پژوهش موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- انجام تحقیق انجام شده به‌صورت تجربی و مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی
- استفاده از هندسه‌ی طراحی شده برای زمینه‌های کاربردی مانند صنعت هوافضا
- طراحی هندسه با بهینه کردن طیف
- استفاده‌ی همزمان از دو آشکارساز
- بررسی زوایای مختلف آشکارساز در طیف به‌دست آمده

فهرست منابع:

- [1]. Skidmore, M., et al., Prompt γ -ray activation analysis of Martian analogues at the FRM II neutron reactor and the verification of a Monte Carlo planetary radiation environment model. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009. 607(2): p. 421-431.
- [۲]. امیری ج، شمسایی زفرقندی م، شیرمردی پ، عادل ر. و امیری ش، (۱۳۹۲) "طراحی سیستم تحلیل گر عناصر سبک بافت به روش فعال سازی نوترونی (NAA) با استفاده از کد MCNP" مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی ایلام، شماره ۵، دوره ۲۱.
- [3]. Alharbi, W. and A. El-Taher, Elemental analysis and natural radioactivity levels of clay by gamma ray spectrometer and instrumental neutron activation analysis. Science and Technology of Nuclear Installations, 2016. 2016.
- [۴]. کرین ک، (۱۳۷۳) "آشنایی با فیزیک هسته‌ای"، مترجم: دکتر ناصر میرفخرایی، دکتر مجید مدرس، مرکز نشر دانشگاهی تهران.
- [5]. Hevesy, G. and H. Levi, The action of neutrons on the rare earth elements, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk, 1936. 14.
- [۶]. سولفانی‌دیس ن، (۱۹۳۸) "اندازه گیری و آشکارسازی تابش های هسته ای"، مترجم: دکتر محمد هادی هادی زاده یزدی، دکتر رحیم کوهی، سیمین، تهران.
- [7]. Alfassi, Z., Activation analysis. Vol. 2. 1990: CRC Press.
- [8]. De Soete, D., R. Gijbels, and J. Hoste (1972). Neutron Activation Analysis. John Wiley and Sons: New York, NY.
- [9]. Shulyakova, O., P. Avtonomov, and V. Kornienko, New developments of neutron activation analysis applications. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015. 195: p. 2717-2725.
- [۱۰]. اصغری زاده ف، (۱۳۹۴) "روش های آنالیز هسته‌ای"، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران.
- [11]. Osei, B., Neutron Activation Analysis of Soils. 2002, University of Ghana.
- [12]. Alfassi, Z.B., Instrumental multi-element chemical analysis. 2012: Springer Science & Business Media.
- [13]. Witkowska, E., K. Szczepaniak, and M. Biziuk, Some applications of neutron activation analysis. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2005. 265(1): p. 141-150.
- [14]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IAEA, Use of research reactors for neutron activation analysis ,2001.
- [15]. Hanna, A., R. Brugger, and M. Glascock, The prompt gamma neutron activation analysis facility at MURR. Nuclear Instruments and Methods, 1981. 188(3): p. 619-627.
- [۱۶]. میری حکیم آباد ه، کوهی فایق ر. و هادی زاده یزدی م.ه، (۱۳۷۹) "کاربرد روش فعال سازی نوترونی در کشف مواد منفجره پلاستیکی" مجله پژوهش فیزیک ایران، شماره ۳، دوره ۲.
- [17]. Gardner, R.P., et al., NaI detector neutron activation spectra for PGNA A applications. Applied Radiation and Isotopes, 2000. 53(4-5): p. 483-497.
- [18]. Al-Jarallah, M., A. Naqvi, and F. Abu-Jarad, Fast and thermal neutron intensity measurements at the KFUPM PGNA A setup. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002. 195(3-4): p. 435-441.
- [19]. Perry, D.L., et al., The use of prompt gamma activation analysis (PGAA) for the analyses and characterization of materials: Photochromic materials. Nuclear

- Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004. 213: p. 527-529.
- [20]. Naqvi, A., et al., Verification of design calculations of a PGNAA setup using nuclear track detectors. Radiation measurements, 2004. 38(1): p. 37-41.
- [21]. Stamatelatos, I., et al. NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF BULK CONCRETE SAMPLES USING PROMPT GAMMA NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS: PRELIMINARY RESULTS. in 4th International Conference on NDT, Hellenic Society for NDT. 2007.
- [22]. Seabury, E., et al., Comparison of DD, DT and Cf-252 neutron excitation of light and medium mass nuclei for field PGNAA applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007. 261(1-2): p. 839-844.
- [23]. Ma, J.-L., et al., Prompt gamma neutron activation analysis of toxic elements in radioactive waste packages. Applied Radiation and Isotopes, 2012. 70(7): p. 1261-1263.
- [24]. Panjeh, H., R.I. Najafabadi, and J. Kettler, Utilization of ^{241}Am - ^9Be Neutron Source in PGNAA Setup Used in Cement Raw Material Analysis.
- [25]. Zhang, J. and X. Tuo, PGNAA neutron source moderation setup optimization. arXiv preprint arXiv:1309.1308, 2013.
- [۲۶]. عزیززاده‌ی تازه‌آباد ل، شیرانی ا، جلالی م، خورسندی ج. و کنعانی ح، (۱۳۹۲) "طراحی ضخامت بهینه برای کندکننده‌ی آب در تحلیل گامای آبی حاصل از فعال‌سازی نوترونی (PGNAA) با استفاده از کد محاسباتی MCNPX و نتایج تجربی" کنفرانس هسته‌های ایران، ۹۴۷، مشهد.
- [27]. Feng, Z. and L. Jun-tao, Monte Carlo simulation of PGNAA system for determining element content in the rock sample. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014. 299(3): p. 1219-1224.
- [۲۸]. غائبی م. و سعادت‌نی نیاری م، (۱۳۹۳) "شناسایی درصد فراوانی مس موجود در خاک معدن سونگون اهر با استفاده از آنالیز فعال‌سازی نوترونی" نشریه‌ی تابش و فناوری هسته‌های، شماره‌ی ۳، دوره‌ی ۱.
- [29]. Xu, J., et al., A study of the trace ^{39}Ar content in argon from deep underground sources. Astroparticle Physics, 2015. 66: p. 53-60.
- [30]. Jiang, Z., et al., Application of PGNAA for Measuring the Carbon and Nitrogen in the Aqueous Solution. Journal of Residuals Science & Technology, 2017. 14(2).
- [۳۱]. بنگیسو م، (۱۳۸۷) "سرامیک‌های مهندسی"، مترجم: دکتر محمد ابراهیم ابراهیمی، دانش پویان جوان، تهران.
- [32]. Win, D.T., Neutron activation analysis (NAA). AU J Technol, 2004. 8(1): p. 8-14.
- [33]. Alfassi, Z.B. and C. Chung, Prompt gamma neutron activation analysis. 1995: CRC Press Boca Raton.
- [34]. Evans, R.D., The Atomic Nucleus. McGraw-Hill. New York, 1955. 19552: p. 785-793.
- [35]. Cohen-Tannoudji, C., J. Dupont-Roc, and G. Grynberg, Atom-photon interactions: basic processes and applications. 1992, Wiley, New York.
- [36]. Knoll, G.F., Radiation detection and measurement. 2010: John Wiley & Sons.
- [37]. Francisco Javier Casado, Salvador Garcí'a-Pareja, Elena Cenizo, Beatriz Mateo, Coral Bodineau, Pedro Gala'n; " *Dosimetric characterization of an ^{192}Ir brachytherapy source with the Monte Carlo code PENELOPE* "; Elsevier, 26, (2010) 132-139.
- [38]. Theodore A. Rapach, Melanie A. Pelcher; " *Gamma Spectroscopy* ", Department of Physics and Astronomy, University of Rochester, Rochester, 14627, 2003.
- [39]. Briesmeister, J.F., MCNP-TM-A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000: p. 2.
- [۴۰]. کلانتر م، (۱۳۸۷) "سرامیک‌های سازه‌ای دما بالا"، انتشارات دانشگاه یزد.

- [41]. Jianbo, Y., et al., MC simulation of a PGNAA system for on-line cement analysis. Nuclear Science and Techniques, 2010. 21(4): p. 221-221-226.
- [42]. Saeed, A., et al., Calculating the ambient dose equivalent of fast neutrons using elemental composition of human body. Applied Mathematics and Computation, 2016. 274: p. 604-610.
- [43]. Panjeh, H., H.M. Hakimabad, and L.R. Motavalli, Improving the performance of $^{241}\text{Am-Be}$ for PGNAA applications using a proper shielding for neutron source and the NaI detector. Nuclear Technology and Radiation Protection, 2010. 25(3): p. 205-211.
- [۴۴]. نصری نصرآبادی م. و سجادی فر ص، (۱۳۹۳) " شبیه‌سازی حفاظی چند لایه برای یک چشمه‌ی استوانه‌ای $^{241}\text{Am-Be}$ به‌منظور کاهش هرچه بیشتر دز معادل نوترون با استفاده کد "MCNP5" مجله‌ی سنجش و ایمنی پرتو، شماره‌ی ۴، دوره‌ی ۲.
- [۴۴]. عبدی‌سرای ا، استکی م ح. و خورسندی ج، (۱۳۹۵) " اندازه‌گیری شدت چشمه‌ی نوترون آمرسیوم-بریلیوم ($^{241}\text{Am-Be}$)" نشریه‌ی تابش و فناوری هسته‌ای، شماره‌ی ۱، دوره‌ی ۳.
- [45]. Saraiva, A., et al., Study of the response of an ORTEC GMX45 HPGe detector with a multi-radionuclide volume source using Monte Carlo simulations. Applied Radiation and Isotopes, 2016. 113: p. 47-52.

Abstract

Prompt gamma neutron activation analysis PGNAA, is one of the most sensitive analytical techniques to determine qualitative and quantitative elements in a sample. This method is based on the conversion of a stable nuclear core into a radioactive nucleus, using neutron irradiation and measure characteristic gamma radiation from the radio core. Due to high precision and sensitivity, as well as the non-destructive nature of this method, it is very applicable and its usage is growing. Accordingly, present thesis attempts to use this method for elemental analysis of three ceramic samples of Si_3N_4 , B_4C and ZrO_2 , which due to their diverse properties, are used extensively in the engineering industry.

First, the MCNPX Monte Carlo computational code was hired to simulate the geometry. To this end, two sources including $^{241}\text{Be-Am}$, and ^{252}Cf were used. The HPGe detector was applied to identify gamma rays released from the interactions between neutrons and samples. It was found that the simulation results in compare to experimental measured values shows acceptable and compatible accordance. As a result, PGNAA could be an effectiveness method in analyzing the element of various samples.

Keywords: Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, Gamma-ray Detection, Neutron Sources



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics

Nuclear Physics MSc Thesis in

**Using neutron activation analysis for elemental analysis of
ceramic samples numerically**

Fariba Zahedi

Supervisor:

Dr. Mohammad reza Shojaei

September 2018

