



۱۳۰۲



دانشگاه شهید بهشتی  
دانشکده مهندسی هسته ای

## طراحی سیستم رادیوگرافی نوترونی با استفاده از کد MCNPX

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته ای  
گرایش کاربرد پرتوها

حمید جعفری

استاد راهنما:

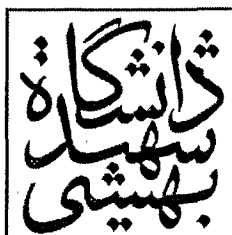
آقای دکتر مجید شهریاری

کتابخانه مرکزی  
دانشگاه شهید بهشتی

۱۳۸۸/۱۱/۰۶

تیر ماه ۱۳۸۸

۱۳۰۲۸۴



دانشگاه شهید بهشتی  
دانشکده مهندسی هسته ای

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته ای - گرایش کاربرد پرتوها  
تحت عنوان:

طراحی سیستم رادیوگرافی نوترونی با استفاده از کد MCNPX

در تاریخ ۱۳۸۸/۶/۱۰ پایان نامه دانشجو، (حمید جعفری)، توسط کمیته تخصصی داوران مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت و با نمره ۱۹/۷۵ ارزشیابی گردید.

۱- استاد راهنما: آقای دکتر مجید شهریاری

۲- استاد داور (داخلی): آقای دکتر فریدون عباسی

۳- استاد داور (بخارجی): آقای دکتر ناصر وثوقی

## تشکر و قدردانی

سپاس خداوند متعال که با لطف بیکران خود در تمام مراحل زندگی حامی و پشتیبان من بوده است.

با تشکر از خانواده ام که در این راه زحمت فراوانی برای من کشیده اند و تشکر ویژه از مادر و برادرم که با حمایت های خود این راه را برای من هموارتر نمودند.

از همسر و همچنین خانواده محترم شان که با بردباری و تشویق شان باعث دلگرمی و آسودگی خاطر من بودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از اساتید خودم، جناب آقای دکتر شهریاری و جناب آقای دکتر عباسی که من افتخار شاگردی این بزرگواران را داشتم، مخصوصاً از آقای دکتر شهریاری که استاد راهنمای اینجانب بودند و راهنمایی های ایشان همواره کمک حال من در پیشبرد این پروژه بوده است، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از جناب آقایان مهندس قادری و مهندس صفوی که در ساخت سیستم آشکارسازی، کمک های فراوانی به من داشتند و همچنین جناب آقای کرمانیان بخاطر کمک های بی دریغ شان نهایت سپاس و قدردانی را دارم.

تشکر ویژه از جناب آقای مهندس آهوپی که در تهیه قطعات دستگاه به ما لطف فراوانی نمودند. از دوستان خودم، مهندس حسین چوپان و مهندس نوید حسن پور که از مشاوره و کمک شان بهره مند شدم و از تمامی دوستانی که در انجام این پروژه به من کمک کردند بی نهایت ممنون و سپاسگزارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان نامه متعلق به دانشگاه شهید بهشتی  
می باشد.

به نام خدا

نام و نام خانوادگی: حمید جعفری

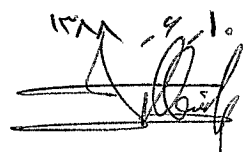
عنوان پایان نامه: طراحی سیستم رادیوگرافی نوترونی با استفاده از کد MCNPX

استاد راهنما: آقای دکتر مجید شهریاری

اینجانب حمید جعفری تهیه کننده پایان نامه کارشناسی ارشد حاضر خود را ملزم به حفظ امانت داری و قدردانی از زحمات سایر محققین و نویسندگان بنا بر قانون Copyright می دانم. بدین وسیله اعلام می نمایم که مسئولیت کلیه مطالب درج شده با اینجانب می باشد و در صورت استفاده از اشکال؛ جداول، و مطالب سایر منابع، بلافاصله مرجع آن ذکر شده و سایر مطالب از کار تحقیقاتی اینجانب استخراج گشته است و امانتداری را به صورت کامل رعایت نموده ام. در صورتی که خلاف این مطلب ثابت شود، مسئولیت کلیه عواقب قانونی با شخص اینجانب می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: حمید جعفری

امضاء و تاریخ: ۱۳۸۸



تقدیم بہ

مادر مہربانم

و

محمد سر عزیزم

<b>چکیده</b>	
نام و نام خانوادگی : حمید جعفری	
عنوان پایان نامه : طراحی سیستم رادیوگرافی نوترونی با استفاده از کد MCNPX	
استاد راهنما : دکتر مجید شهریاری	
درجه تحصیلی : کارشناسی ارشد	تاریخ فراغت از تحصیل : ۱۳۸۷-/-
رشته : مهندسی هسته ای	گرایش : کاربرد پرتوها
دانشگاه : شهید بهشتی	دانشکده: مهندسی هسته ای
کلید واژه ها : رادیوگرافی نوترونی، کد MCNPX ، موازی ساز ، سیستم آشکارسازی ، فوتودیود	
<b>چکیده:</b>	
<p>تصویربرداری نوترونی بعنوان یکی از روشهای آزمون غیر مخرب مواد، بسرعت در حال توسعه و پیشرفت بوده و که دارای مزیت های بارزی نسبت به تصویربرداری پرتوی گاما (یا پرتوی ایکس) معمول است. سطح مقطع های نوترونی اغلب مستقل از عدد اتمی مواد (Z) است، در نتیجه تصویربرداری نوترونی قادر به تشخیص مواد با عدد اتمی یکسان و یا مواد با عدد اتمی پائین می باشد حتی اگر این مواد توسط موادی با عدد اتمی بالا پوشیده شده باشند. در این پروژه یک سیستم رادیوگرافی نوترونی قابل حمل با استفاده از چشمه ی رادیویزوتوپی <math>^{241}\text{Am-Be}</math> با اکتیویته ی ۵ کوری و سیستم آشکارسازی دیجیتال تابلو تخت، طراحی شده و یک نمونه آزمایشگاهی از سیستم تصویربرداری دیجیتال مبتنی بر شبکه فوتودیودی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. محاسبات شبیه سازی با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX انجام گرفت.</p> <p>در طراحی موازی ساز تمامی پارامترهای موثر برای داشتن یک باریکه نوترونی نسبتاً خالص، موازی شده و یکنواخت در نظر گرفته شده و محاسبه شده است. طول مناسب برای موازی ساز بگونه ای محاسبه شده اند که ضمن داشتن باریکه نوترونی مناسب، شار نوترونی در حد قابل قبولی برای انجام تصویربرداری نوترونی، باقی بماند. طول در نظر گرفته شده برای موازی ساز از چشمه تا پرده ی آشکارساز برابر ۳۶ سانتیمتر و قطر دهانه ی داخلی آن ۲/۵ سانتیمتر (<math>\frac{L}{D} \sim 14/5</math>) است که شار نوترونی حرارتی در مجرای خروجی موازی ساز <math>4/49 \times 10^1 \text{ n/cm}^2\text{s}</math> با نسبت بالایی از <math>\frac{n}{\gamma}</math> (<math>3 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{cGy}</math>) بوده است. با استفاده از قابلیت تشکیل تصاویر رادیوگرافی در MCNPX، تصاویری از چندین نمونه ی آزمایشی که در مقابل باریکه ی نوترونی حاصل از موازی ساز طراحی شده قرار گرفتند، بدست آمد. همچنین سیستم آشکارساز نوری حساس به مکان در یک آرایه فوتودیودی <math>10 \times 10</math> و به ابعاد <math>5 \times 5 \text{ cm}</math> با تمامی مدارها و برد های مربوطه، طراحی و ساخته شد و درستی کارکرد این سیستم با استفاده از یک منبع نور مرئی و چندین نمونه ی آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت.</p>	



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۲	۱-۱- معرفی تصویربرداری نوترونی
۱۴	۲-۱- تازبخچه تصویربرداری نوترونی
۱۶	۳-۱- موازی ساز
۱۷	۱-۳-۱- شکل هندسی موازی ساز
۱۸	۲-۳-۱- مواد کند کننده
۱۸	۳-۳-۱- مواد دیوارها و آستر داخلی
۲۰	۴-۳-۱- گاز پر کننده فضای داخلی موازی ساز
۲۰	۵-۳-۱- درپوش و دیافراگم ها در انتهای موازی ساز
۲۱	۶-۳-۱- فیلترهای گاما و نوترون
۲۲	۴-۱- پارامترهای طراحی موازی ساز
۲۲	۱-۴-۱- نسبت موازی بودن
۲۳	۲-۴-۱- واگرایی باریکه
۲۴	۳-۴-۱- شدت پرتوهای گاما
۲۴	۴-۴-۱- شار نوترونی
۲۵	۵-۱- سیستم های آشکارسازی
۲۸	۶-۱- کاربردهای تصویربرداری نوترونی
<b>فصل دوم: فیزیک تصویربرداری نوترونی</b>	
۳۰	۱-۲- اصول فیزیکی تصویربرداری نوترونی
۳۵	۲-۲- کمیت سنجی (معرفی عناصر یک جسم)
۳۹	۳-۲- سیستم آشکارسازی تصویر
۳۹	۱-۳-۲- الکتروود تصویربرداری
۴۲	۲-۳-۲- پرده های سوسوزن و آشکارساز CCD
۴۲	۳-۳-۲- تابلوهای تخت سیلیسیوم غیر بلوری
۴۳	۴-۲- کاهش قدرت تصویربرداری
۴۹	۵-۲- رادیوگرافی نوترونی بلادرنگ
۴۹	۶-۲- تصویربرداری با نوترون های سریع
<b>فصل سوم: طراحی نوترونیکی سیستم تصویر برداری نوترونی</b>	
۵۱	۱-۳- چشمه $^{241}\text{Am-Be}$
۵۴	۲-۳- طراحی موازی ساز
۵۸	۳-۳- شبیه سازی مونت کارلویی از سیستم رادیوگرافی نوترونی
۶۰	۱-۳-۳- کد MCNPX

۶۱	..... مدل موازی ساز ۲-۳-۳
۶۸	..... آزمایش موازی ساز ثانویه ۱-۳-۳
۷۲	..... مدل سازی آشکارساز ۴-۳
۷۳	..... تالی رادیوگرافی ۱-۴-۳
۷۶	..... نتایج آزمایش های شبیه سازی ۵-۳
۷۶	..... نفوذسنج ها برای تعیین کیفیت تصویربرداری ۱-۵-۳
۷۷	..... نمونه های آزمایشی ۲-۵-۳
۸۲	..... شبیه سازی MCNPX از تابع پهن شدگی نقطه ای ۳-۵-۳
۸۵	..... نمونه های آزمایشی برای مقایسه با رادیوگرافی فوتونی ۴-۵-۳
۸۷	..... شبیه سازی آشکارساز تصویربرداری نوترونی ۶-۳

### فصل چهارم: طراحی سیستم آشکارسازی برای تصویربرداری نوترونی ۹۱

۹۲	..... طراحی سیستم آشکارسازی ۱-۴
۹۵	..... شبکه فوتودیودی ۱-۱-۴
۹۶	..... برد حسگر ۱-۱-۱-۴
۱۰۱	..... برد کنترلی ۲-۱-۱-۴
۱۰۴	..... پردازش داده ها ۲-۱-۴
۱۰۵	..... نتایج سیستم تصویربرداری نوری ۲-۴

### فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۱

۱۱۲	..... نتیجه گیری ۱-۵
۱۱۴	..... پیشنهادات ۲-۵
۱۱۶	..... پیوست
۱۱۸	..... منابع و مأخذ

## پیش گفتار

رادیوگرافی نوترون یکی از تست های غیر مخرب و روشهای تصویر برداری از قطعات مختلف و بویژه قطعات پلیمری می باشد. سیستم رادیوگرافی نوترونی شامل سه جزء اصلی چشمه ، موازی ساز و آشکارساز است. در این پروژه طراحی بر اساس چشمه رادیوایزوتوپی  $^{241}\text{Am-Be}$  و آشکارسازی با استفاده از آرایه ای از فوتودیودها به انجام رسیده است. مزیت این نوع آشکارسازی بر روشهای قدیمی، تصویر برداری بدون نیاز به فیلم و زمان ظهور آن و همچنین قابلیت تصویر برداری دینامیک می باشد. عملکرد یک سیستم رادیوگرافی نوترونی بر اساس بدست آوردن یک باریکه نوترونی بهینه و مناسب و همچنین چگونگی تشکیل تصویر در آشکارساز حساس به مکان توسط کد مونت کارلوی MCNPX شبیه سازی شده است.

در این پروژه سعی شده است مجموعه نسبتاً کاملی از ویژگی های یک سیستم تصویربرداری نوترونی جمع آوری و بر اساس تجهیزات و مواد موجود و با در نظر گرفتن قابل حمل بودن، سیستم تصویربرداری به همراه نتایج بدست آمده از شبیه سازی های این سیستم طراحی و محاسبه شود. و همچنین یک نمونه آزمایشگاهی از سیستم تصویربرداری دیجیتال مبتنی بر شبکه فوتودیودی طراحی و ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

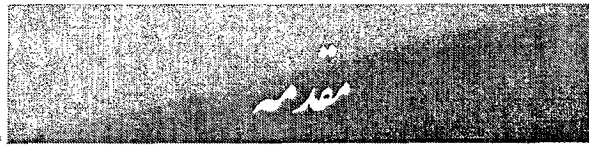
در فصل اول به بیان مقدمه ای از تصویربرداری نوترونی و تاریخچه ی مختصری از آن می پردازیم و اجزای اصلی یک سیستم رادیوگرافی نوترونی را معرفی می کنیم.

در فصل دوم اصول فیزیکی تصویربرداری نوترونی توضیح داده خواهد شد و انواع سیستم های آشکارسازی در تصویربرداری به اختصار شرح داده می شود.

در فصل سوم طراحی نوترونیک از یک سیستم تصویربرداری نوترونی بر اساس چشمه رادیوایزوتوپی ( $^{241}\text{Am-Be}$ ) و قابل حمل بودن سیستم با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX انجام گرفته و تمامی پارامترهای یک موازی ساز نوترونی مناسب بررسی شده و همچنین با استفاده از قابلیت تشکیل تصاویر رادیوگرافی در این کد، تصاویری از چندین نمونه ی آزمایشی که در مقابل باریکه ی نوترونی حاصل از موازی ساز طراحی شده قرار گرفتند، بدست آورده شد.

در فصل چهارم طراحی یک سیستم آشکارسازی برای تصویربرداری نوترونی شرح داده شده است. این سیستم در فاز اولیه بصورت یک آشکارساز تصویربرداری نوری می باشد که عملکرد آن براساس نور تولید شده از آشکارسازهای سوسوزنی است. مراحل ساخت و نتایج آزمایش چندین نمونه ی آزمایشی هم مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت در فصل پنجم به بیان نتیجه گیری و ارائه ی پیشنهادات برای ادامه ی کار پرداخته شده است.

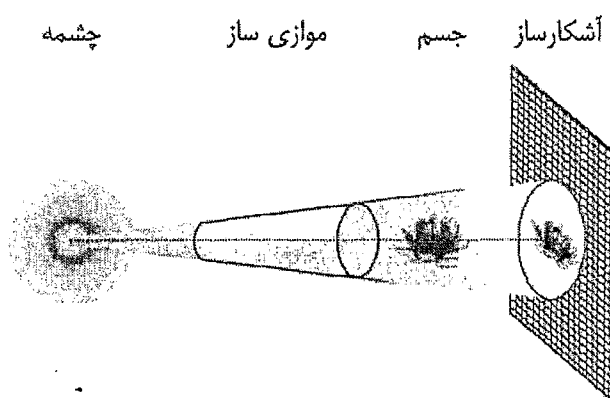
# فصل اول



## ۱-۱ معرفی تصویر برداری نوترونی

یک تصویر دو بعدی را می توان به صورت یک تابع دو متغیره  $f(x,y)$  تعریف کرد ، که  $x$  و  $y$  جهت های مختصات فضایی هستند و دامنه  $f$  در مختصات  $(x,y)$  شدت و یا تراز خاکستری<sup>۱</sup> تصویر در هر نقطه نامیده می شود. تراز خاکستری می تواند بیان کننده هر خصوصیتی از جسم باشد و بستگی به چشمه ای دارد که برای ایجاد تصویر مورد استفاده قرار می گیرد. در حالت کلی هر نوع تصویری از جسم، می تواند بیان کننده ی پارامترهای فیزیکی متفاوتی از آن جسم باشد.

در شکل (۱-۱) اصول پیکربندی یک سیستم تصویر برداری نوترونی به شکل ساده ای نشان داده شده است. نوترونهای ساطع شده از چشمه توسط یک موازی ساز به سمت جسم گزینش و هدایت شده و با مواد نمونه برهمکنش می کنند. آشکارساز در پشت جسم، تمامی نوترونهای عبوری چه آنهایی که با جسم برهمکنش کرده اند و چه آنهایی که برهمکنش نکرده اند را ثبت می نماید. صفحه ی آشکارساز عمده تاً بطور عمود بر باریکه قرار می گیرد و بصورت یک آرایه دوبعدی از نقاط تصویر (پیکسلها) می باشد.



شکل (۱-۱): پیکربندی ساده ای از یک سیستم تصویربرداری نوترونی

امروزه معمولاً تصویربرداری رایج مورد استفاده، تصویربرداری نور مرئی است که در آن تراز خاکستری، بیان کننده ی شدت اپتیکی در هر نقطه از سطح جسم می باشد. اما در واقع انواع بسیار گوناگونی از تصویر برداری با چشمه هایی متفاوت از قبیل تصویر برداری پرتو گاما، پرتو ایکس، نوترونی، مادون قرمز، امواج ماکرو، امواج رادیویی، الکترونی، فراصوتی و ... وجود دارند.

در تصویر برداری نوترونی، عبور باریکه نوترونی از جسم، تصویری را تولید می کند که بیان کننده میزان تغییر دو بعدی از خصوصیات تضعیف نوترونی جسم می باشد. تفاوت های بسیار اساسی میان تصویر برداری نور مرئی و تصویر برداری نوترونی وجود دارد. در تصویر برداری نور مرئی، تنها اطلاعات سطحی از جسم در تصویر بیان می شود ولی در تصویر برداری نوترونی درون یک جسم نیز به تصویر کشیده می شود. زیرا که نوترون ها ( ذرات بدون بار) می توانند به درون اجسام نفوذ کنند. به همین دلیل در تصویربرداری نوترونی معمولاً از باریکه ی عبوری و در تصویر برداری نور مرئی از باریکه بازتابی استفاده می شود. تصویربرداری نوترونی به صورت یک تکنیک آزمون غیر مخرب<sup>۱</sup> و اندازه گیری غیرتخریبی<sup>۲</sup>، از دهه 1950 مورد استفاده قرار گرفت. برخلاف پرتوهای ایکس، نوترون ها با مواد گوناگونی با سطح مقطع های مشخص که تا حد زیادی مستقل از عدد اتمی مواد (Z) است برهمکنش می کنند. هیدروژن و بور دو نمونه از موادی هستند که دارای سطح مقطع جذبی بالایی می باشند در حالیکه آهن دارای سطح مقطع نوترونی پایین تری است. بنابراین با تصویربرداری نوترونی، به دست آوردن تصاویری از این قبیل مواد (دارای سطح مقطع نوترونی بالا) حتی اگر به مقدار ناچیزی در نمونه وجود داشته باشند، ممکن خواهد بود.

این ماهیت متفاوت از برهمکنش نوترون ها با ماده ناشی از این حقیقت است که نوترون ها برخلاف فوتون ها که به طور عمده با الکترون ها برهمکنش دارند، به علت خنثی بودن، تنها با هسته اتم ها برهمکنش می کنند. بنابراین سطح مقطع های فوتونی با افزایش عدد اتمی ماده (Z)

<sup>۱</sup> Non-Destructive testing (NDT)  
<sup>۲</sup> Non-Invasive Mesurement (NIM)

افزایش پیدا می کنند. به همین دلیل امکان مشاهده مواد سبک (Z پایین) در یک نمونه با استفاده از فوتون ها وجود ندارد و همچنین تفکیک مواد سنگین (Z بالا) در صورتی که تفاوت کافی در عدد اتمی آن ها نباشد، مشکل است. اما با وجود این مزیت ها که تصویربرداری نوترونی را بر فوتونی (پرتوهای ایکس و گاما) برتری می دهد، این تصویربرداری (نوترونی) معایبی نیز دارد. به طور کلی این دو روش تصویربرداری (نوترونی و فوتونی)، مکمل یکدیگر می باشند. انتخاب هر کدام از آنها به مسئله مورد نظر بستگی دارد. تصویر ساده ای از احتمال برهمکنش ها بصورت یک جدول تناوبی در شکل های (۱-۲) و (۱-۳) نشان داده شده است، که تراز خاکستری بیان کننده قدرت تضعیف مخلوطهای ایزوتوپی طبیعی است. ضرایب تضعیف نیز در زیر نام هر عنصر در این جدول آورده شده است.

1a	2a	3b	4b	5b	6b	7b	8	9	1b	2b	3a	4a	5a	6a	7a	0
H 0.02																He 0.02
Li 0.06	Be 0.22										B 0.28	C 0.27	N 0.11	O 0.16	F 0.14	Ne 0.17
Na 0.13	Mg 0.24										Al 0.38	Si 0.33	P 0.25	S 0.30	Cl 0.23	Ar 0.20
K 0.14	Ca 0.26	Sc 0.48	Ti 0.73													Br 0.90
Rb 0.17	Sr 0.86	Y 1.81	Zr 2.71	Nb 3.43	Mo 4.28	Tc 5.00	Ru 5.71	Rh 6.00	Pd 6.13	Ag 5.87	Cd 4.84	In 4.31	Sn 3.99	Sb 4.28	Te 4.08	I 3.45
Cs 1.42	Ba 2.76	La 5.04	Hf 19.70	Ta 25.47	W 30.49	Re 34.47	Os 37.92	Ir 39.01	Pt 38.61	Au 35.84	Hg 25.88	Tl 23.23	Pb 22.81	Bi 20.28	Po 20.22	Rn 9.77
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha												
	11.80	24.47														

	Ca	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Carbonates	5.79	6.23	6.46	7.35	7.89	5.88	8.69	9.48	10.17	10.91	11.70	12.49	9.32	14.07
Alloys	28.85	39.65	49.03											x-13y

## Legend

Attenuation coefficient [cm<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>] = sp.gr.\* μ<sub>0</sub>

sp.gr.: Handbook of Chemistry and Physics, 56th edition 1975-1976.

μ<sub>0</sub>: J. H. Hubbell and S. M. Seltzer Ionizing Radiation Division, Physics Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899.<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMass/Coeff/ab3.html>

شکل (۱-۲): جدول تناوبی عناصر با ضریب تضعیف برای پرتوی ایکس در ۱۲۰ kV

1a	s	3b	4b	5b	6b	7b	8	1b	2b	3a	4a	5a	6a	7a
Li 3.44										B 101.60	C 0.56	N 0.43	O 0.17	F 0.20
Be 3.30	0.79									Al 0.10	Si 0.11	P 0.12	S 0.06	
Na 0.09	Mg 0.15									Zn 0.35	Ga 0.49	Ge 0.47	As 0.67	Se 0.73
K 0.06	Ca 0.08	Sc 0.60	Ti 0.72	V 0.54	Cr 0.52	Mn 0.58	Co 3.92	Ni 2.01	Cu 2.01	Ag 4.04	Cd 115.11	In 7.59	Sn 0.21	Sb 0.30
Rb 0.08	Sr 0.14	Y 0.27	Zr 0.39	Nb 0.40	Mo 0.52	Ru 0.58	Rh 10.98	Pd 0.78	Ir 4.04	Au 6.23	Hg 16.21	Tl 0.47	Pb 0.58	Bi 0.27
Cs 0.29	Ba 0.07	La 0.52	Hf 4.98			Re 5.85	Os 30.46							
Fr	Ra 0.34	Ac	Rf	Ha										
	Ce 0.14	Pr 0.41		Pm 5.72	Sm 171.47	Eu 94.58	Gd 1479.04	Tb 0.93	Dy 32.42	Ho 2.22	Er 5.48	Tm 3.53		
	Th 0.59	Pa 0.46	U 0.82	Np 9.60	Pu 50.20		Cm 2.01	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr neut.

Legend

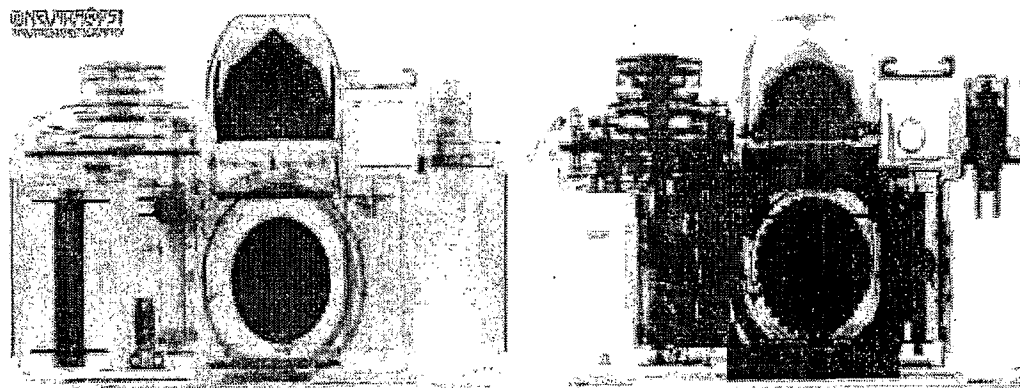
$$\text{Attenuation coefficient [cm}^{-1}\text{]} = \frac{\sigma\text{-total} \cdot \text{sp.gr.} \cdot 0.6023}{\text{at.wt}}$$

$\sigma$ -total: JEF Report 14. Table of simple integral neutron cross section data from JEF-2.2, ENDF-VI, JENDL-3.2, BROND-2 AND CENDL-2, AEN NEA, 1994. and Special Feature: Neutron scattering lengths and cross sections, Varley F. Sears, AECL Research, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0, Neutrons News, Vol. 3. <http://www.nrc.nist.gov/resources/n-lengths/list.html>.

شکل (۱-۳): جدول تناوبی عناصر با ضریب تضعیف برای نوترون های حرارتی

نمونه ی از اختلاف میان رادیوگرافی نوترونی و تصویربرداری فوتونی در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. توجه کنید که چگونه یک رادیوگرافی نوترونی (در سمت چپ) قسمت های اصلی پلاستیکی مانند میله گردان فیلم را نشان می دهد، در حالیکه تصویر پرتوی X (در سمت راست) یک نمای واضح از قسمت های فلزی را می دهد و میله گردان پلاستیکی در این حالت قابل مشاهده نیست. این خاصیت سبب می شود که برای آزمونهای غیر مخربی که پرتوهای ایکس قادر به تصویربرداری از جسم مورد نظر نیستند، نظیر نمونه هایی در درون غلاف فلزی، از تصویربرداری نوترونی استفاده شود.





شکل (۱-۴): رادیوگرافی پرتوی ایکس (سمت راست) در مقابل رادیوگرافی نوترونی (سمت چپ) [۳۹]

اولین مشکل در تصویربرداری نوترونی، دسترسی به چشمه های نوترونی با شار بالا می باشد. در مورد فوتون ها، چشمه هایی را می توان ( پرتوهای ایکس ) به آسانی با شار مورد نیاز تولید نمود و قیمت خیلی بالایی هم ندارند. در مورد نوترون ها، چشمه های قابل دسترس را می توان به سه دسته عمده تقسیم بندی نمود [1]:

- چشمه های راکتور
- چشمه های شتاب دهنده
- چشمه های رادیوایزوتوپی

این چشمه ها به ترتیب کاهش مرتبه شار نوترونی مرتب شده اند. اما از نظر قیمت این چشمه ها (به غیر از چشمه های رادیوایزوتوپی که دارای حداقل شار نوترونی می باشند) به طور قابل توجهی گرانتر از چشمه های فوتونی می باشند. جزئیات بیشتر در مورد هر یک از این چشمه ها در ادامه بررسی خواهد شد. همچنین مقایسه ای از این چشمه ها در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول (۱-۱): مروری بر چشمه های نوترونی به منظور تصویربرداری

نوع چشمه	راکتور هسته ای	نوترون ژنراتور	چشمه متلاشی کننده	رادویوایزوتوپ
برهمکنش	شکافت	همجوشی D-T	تلاشی توسط پروتون ها	$\gamma$ -n
مواد مورد استفاده	U-235	دوتریوم ، تریتیوم	هسته های بسیار سنگین	Am , Be
شدت نوترون های اولیه (n/s)	$10^{16}$	$4 \times 10^{11}$	$10^{15}$	$10^8$
شدت باریکه ( $n/cm^2s$ )	$10^1$ تا $10^6$	$10^5$	$10^7$ تا $10^6$	$10^3$
انرژی نوترون	سریع، حرارتی و سرد	سریع، حرارتی	سریع، حرارتی و سرد	حرارتی، ۲۴ keV
محدودیت استفاده	Burn up	طول عمر تیوب	طول عمر هدف	نیمه عمر رادیوایزوتوپی
دوره کارکرد نوعی	۱ ماه	۱۰۰۰ ساعت	۱ سال	۴۳۲ سال
قیمت تاسیسات	بالا	متوسط	بسیار بالا	پائین

### • چشمه های راکتوری

چشمه های راکتوری با شار نوترون حرارتی بسیار بالا که قدرت تفکیک بالایی را برای رادیوگرافی به همراه دارد، در تصویربرداری نوترونی مورد استفاده قرار می گیرند. اینگونه چشمه ها قابل حمل نبوده، بسیار گران قیمت و دارای زمانهای پرتودهی از مرتبه ی چندین دقیقه و شار نوترون حرارتی در حدود  $10^6 - 10^7 n/cm^2s$  می باشند.

پارامترهای مهم برای انجام رادیوگرافی نوترونی با استفاده از راکتور هسته ای عبارتند از: پیک شار حرارتی، امکان دستیابی به آن و آلودگی های ناشی از نوترون های سریع و پرتوهای گاما. آلودگی ناشی از پرتوهای گاما را می توان تا حد زیادی با قراردادن یک فیلتر تک بلسوری بیسموت در مسیر باریکه نوترونی کاهش داد. این فیلتر تاثیر ناچیزی در شدت نوترونی در انرژی های حرارتی دارد. برای استفاده ی از راکتور هسته ای به منظور رادیوگرافی نوترونی، لازم است توان حرارتی تا حد امکان پائین نگه داشته شود چراکه حرارت تولید شده در راکتور عامل غیر ضروری در رادیوگرافی می باشد.

در تصویربرداری از پدیده های گذرا، عملکرد پالسی راکتور های هسته ای می تواند یک مزیت عمده محسوب شود. راکتورهای از قبیل نوع TRIGA دارای هر دو عملکرد حالت پایدار و پالسی هستند.

### • چشمه های شتابدهنده

به طور خلاصه واکنش هایی که برای تولید نوترون در شتابدهنده ها به کار می روند به گروه های کلی

زیر تقسیم می شوند:

الف- واکنش های (p,n)

ب- واکنش های (d,n)

ج- واکنش های (t,n)

برای تولید نوترون های تک انرژی در فاصله انرژی چند صد keV تا 20 MeV از واکنش های زیر

استفاده می شود که در جدول (۲-۱) نشان داده شده اند.

جدول (۲-۱): برهم کنش های مهم برای تولید نوترون تک انرژی بین چند صد keV تا 20 MeV.

نوع واکنش	محدوده انرژی (MeV)	هدف	بهره در صفر درجه ( $n \cdot Sr^{-1} \cdot \mu \cdot A^{-1}$ )	پهنای انرژی keV
${}^7Li(p,n){}^7Be$	0.2-0.7	لیتیوم جامد	$6 \times 10^6 - 3 \times 10^7$	30
${}^3H(p,n){}^3He$	0.7-3	گاز	$3/3 \times 10^7 - 1/6 \times 10^8$	100
${}^3H(p,n){}^3He$	0.7-3	Ti <sub>T1.5</sub>	$5 \times 10^6 - 1/7 \times 10^7$	100
${}^2H(d,n){}^3He$	3.5-8	گاز	$2/8 \times 10^7 - 7/5 \times 10^7$	100
${}^2H(d,n){}^3He$	3.5-8	Ti <sub>D1.5</sub>	$5 \times 10^6 - 9 \times 10^6$	100
${}^3H(d,n){}^3He$	3-13	گاز	$\approx 10^8$	100
${}^3H(d,n){}^4He$	14-20	گاز	$\approx 8 \times 10^6$	100

از نقطه نظر رادیوگرافی نوترونی، یکی از معایب چشمه های نوترونی با برهمکنش d-T، تولید نوترون ها با انرژی نسبتا بالا می باشد. چراکه کند کردن این نوترون های پر انرژی تا حدی مشکل ساز خواهد بود. یک عیب دیگر در ارتباط با این چشمه ها برای انجام رادیوگرافی نوترونی، شدت پیوسته ی بالای نوترون های تولید شده از این ژنراتورها می باشد که باعث کاهش عمر مفید

هدف خواهد شد [2]. از مزایای این چشمه های نوترونی، بکارگرفتن حجم بزرگی از مواد سبک هدف، هم بعنوان چشمه ی نوترونی و هم بعنوان کند کننده می باشد. از دیگر موارد قابل اشاره برای این نوع چشمه ها، وجود زمینه ی بسیار بالایی از پرتوهای ایکس و گاما در باریکه نوترونی است که سبب ایجاد مشکل در آشکارسازهای نوترونی خواهد شد.

در کل، چشمه های شتابدهنده امروزه بعنوان یکی از چشمه های خوب برای انجام رادیوگرافی نوترونی مورد استفاده قرار می گیرند اما نیاز به نگهداری مداوم داشته و همچنین خروجی نوترونی آنها به ازای ۴ ساعت استفاده از جریانهای باریکه ی ۴ mA به اندازه ی یک مرتبه ی بزرگی کاهش پیدا می کند. بالاترین خروجی مفید از این چشمه ها تقریباً برابر با  $10^{11} \text{ n/cm}^2\text{s}$  می باشد.

#### • چشمه های رادیوایزوتوپی

چشمه های رادیوایزوتوپی دارای مزیت های عمده ای می باشند از جمله اینکه نیازی به منبع تغذیه ی خروجی ندارند، قابل حمل بوده و قابل اعتماد هستند. از نظر قیمتی نیز، چشمه های رادیوایزوتوپی نوترونی در حال حاضر از ارزاترین چشمه های نوترونی هستند. برخی از این چشمه ها را می توان برای انجام رادیوگرافی نوترونی مورد استفاده قرار داد [۳-۵]. جدول (۳-۱) نشان دهنده ی پارامترهای اساسی برای چشمه های رادیوایزوتوپی مورد استفاده در رادیوگرافی نوترونی می باشد.

جدول (۳-۱): خصوصیات چشمه های رادیوایزوتوپی نوترونی مورد استفاده در رادیوگرافی نوترونی.

چشمه	برهمکنش	نیمه عمر	متوسط انرژی نوترونی (MeV)	خروجی نوترونی ( $\text{ns}^{-1}\text{g}^{-1}$ )
$^{124}\text{Sb-Be}$	( $\gamma\text{-n}$ )	۶۰ روز	۰.۲۴	$2/7 \times 10^9$
$^{210}\text{Po-Be}$	( $\alpha\text{-n}$ )	۱۳۸ روز	۴/۳۰	$1/28 \times 10^{10}$
$^{239}\text{Pu-Be}$	( $\alpha\text{-n}$ )	۸۹ سال	۴/۰	$4/7 \times 10^7$
$^{241}\text{Am-Be}$	( $\alpha\text{-n}$ )	۴۳۲ سال	۴/۵۰	$1/0 \times 10^7$
$^{242}\text{Cm-Be}$	( $\alpha\text{-n}$ )	۱۶۳ روز	۴/۰	$1/46 \times 10^{12}$
$^{252}\text{Cf}$	شکافت خودبه خودی	۲/۶۳ سال	۲/۳	$2/52 \times 10^{12}$