١٠٨٦٩٣

۸۷/۱/۱۰۰۵۰۱
۸۷/۱۰/۱۰

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی هسته ای

گروه راکتور

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی هسته ای

طراحی حفاظ (cask) ماشین تعویض سوخت یک راکتور

دانشجو : **سمیرا کاشی**

استاد راهنما

دکتر امیر سعید شیرانی

دکتر رضا سیاره

استاد مشاور

مهندس تابش

مرداد ۸۷

۱۳۸۷/۱۰/۰۶

۱۰۸۶۹۳

دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

بسمه تعالی

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

" صورتجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد "

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۲۰۲۶/د/۲۰۰ مورخ ۱۳۸۷/۵/۱۹ جلسه هیات داوران ارزیابی پایان نامه خانم **سمیرا کاشی** به شماره شناسنامه :**۱۹۰۷** صادره از : **قم** متولد : **۱۳۶۱** دانشجوی دوره کارشناسی ارشدپیوسته/ناپیوسته**رشته مهندسی هسته ای (راکتور)**
با عنوان:

طراحی Cask ماشین تعویض سوخت یک راکتور

به راهنمایی:

۱- آقای دکتر امیرسعید شیرانی
۲- آقای دکتر رضا سیاره

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۷/۵/۲۰ تشکیل گردید و بر اساس رای هیات داوری و با عنایت به ماده ۲۰ آیین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۹/۱ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱- استاد راهنما: **آقای دکترامیر سعید شیرانی**
۲- استاد راهنما: **آقای دکتررضا سیاره**
۳- استاد مشاور: **آقای مهندس علیرضا تابش**
۴- داورداخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی: **آقای دکتر ذوالفقاری**
۵- داور خارجی: **آقای دکتر صدیقی**

سپاس و قدردانی:

سپاس و آفرین ایزد جهان آفرین راست. آن که اختران رخشان به پرتو روشنی و پاکی او تابنده ، چرخ گردون به خواست و فرمان او پاینده .
آفریننده ای که پرستیدن اوست سزاوار. دهنده ای که خواستن جز از او نیست خوشگوار. هست کننده پس از نیستی، نیست کننده پس از هستی. ارجمند کننده بندگان از خواری. . .

از دست و زبان که برآید　　کز عهدهٔ شکرش به در آید؟

از اساتید محترم جناب آقای دکتر شیرانی و جناب آقای دکتر سیاره جهت قبول مسؤلیت و راهنمائی های ایشان به عنوان اساتید راهنمای پروژه، تشکر و قدردانی می نمایم و همچنین از جناب آقای مهندس تابش به عنوان استاد مشاور جهت راهنمائی های مفیدشان که در پیشبرد این پروژه نقش داشته است تشکر و قدردانی می گردد.
در ادامه جا دارد از جناب آقای دکتر فیض جهت فراهم آوردن امکانات و تسهیلات لازم برای انجام این پروژه تشکر و قدردانی به عمل آید.
در پایان از خانواده ام که با تشویق ها، دلگرمی ها و زحمات فراوانشان زمینه مساعد را برای ادامه تحصیل اینجانب فراهم آورده اند کمال تشکر و قدر دانی و احترام را به عمل می آورم.

سمیرا کاشی
مرداد ۸۷

تقدیم به :

مهر مادرم تا بیاسایم

و

تلاش پدرم تا بیاموزم

و

حمایت های همسرم تا ادامه دهم.

چکیده

نام و نام خانوادگی : سمیرا کاشی

عنوان پایان نامه : طراحی cask ماشین تعویض سوخت یک راکتور

استاد راهنما : دکتر امیر سعید شیرانی – دکتر رضا سیاره

استاد مشاور: مهندس تابش

درجه تحصیلی : کارشناسی ارشد | **تاریخ فراغت از تحصیل** : ۸۷/۵/۲۰

رشته : مهندسی هسته ای | **گرایش** : راکتور

دانشگاه : شهید بهشتی | **دانشکده** : مهندسی هسته ای

کلید واژه ها : اکتیویته مجتمع سوخت مصرف شده، چشمه حجمی استوانه ای ، طراحی حفاظ ، طراحی بهینه

چکیده :

هدف این پروژه طراحی حفاظ ماشین تعویض سوخت یک راکتور هسته ای می باشد. مسؤلیت این حفاظ آن است که بعد از خاموش شدن راکتور، مجتمع سوخت مصرف شده توسط آن از قلب راکتور خارج وبه استخر سوخت انتقال یابد.

به طور کلی هدف از طراحی حفاظ کاهش دز حاصل از چشمهٔ گامای ناشی از سوخت مصرف شده ، به منظور رفع خطرات بیولوژیکی تشعشعات هسته ای می باشد. ولی از دیدگاه مهندسی در یک طراحی بهینه علاوه بر کاهش دز، پارامتر هایی از قبیل وزن و ضخامت حفاظ و هزینه مواد به کار رفته نیز مهم می باشند. در این پروژه، ما نیز به دنبال رسیدن به طراحی بهینه می باشیم.

در فصل اول به جنبه های مختلف حفاظت در برابر پرتوها پرداخته ایم که عبارتند از؛ اندرکنش پرتوها، خواص موادی که به عنوان حفاظ به کار می روند، روش بدست آوردن فلاکس و دز از راه جبری برای چشمه های مختلف ، استانداردهای پرتوگیری مشاغل و افراد جامعه . در فصل دوم چگونگی استفاده از کدهایMCNP4C و کد ORIGEN2 آمده است. در فصل سوم مراحل انجام محاسبات و نتایج این پروژه به تفصیل آمده است و در فصل چهارم جمع آوری کارهای انجام شده آورده شده است و نیز پیشنهاداتی ارائه شده است.

فهرست مطالب

فصل ۱ - مبانی حفاظ گذاری ۱

مقدمه: ۲

۱-۱- برهمکنش پرتو با ماده ۳

۱-۲- رده بندی برهمکنش فوتون ٤

۱-۲-۱- جذب فوتوالکتریک ٤

۱-۲-۲- پراکندگی کامپتون ٥

۱-۲-۳- تولید زوج ٦

۱-۲-۴- فروپاشی فوتونی ۷

۱-۳- رده بندی برهمکنش های نوترون ۷

۱-۴- چشمه های نوترونی ۹

۱-۴-۱- نوترون های حاصل از شکافت ۹

۱-۴-۲- نوترون های حاصل از برهمکنش (α, n) ۱۱

۱-۴-۳- نوترون حاصل از عناصر اکتیو شده ۱۲

۱-۴-۴- فوتو نوترون ها ۱۲

۱-۵- چشمه های فوتون گاما ۱۳

۱-۵-۱- فوتون های گامای آنی شکافت ۱۳

۱-۵-۲- گامای حاصل از پاره های شکافت ۱۳

۱-۵-۳- فوتون گامای گیر افتاده ۱۵

۱-۷- طراحی حفاظ ۱٦

سرب ۱۷

اورانیوم ۱۸

تنگستن ۱۹

فولاد ۱۹

بتن ۲۰

آب ۲۲
پلی اتیلن ۲۲
خاک و شن ۲۲
گرافیت ۲۳
بور ۲۳
فلزات مختلف دیگر: ۲۳
۱-۸- محاسبات شار غیر برخوردی ۲٤
۱-۸- ۱ روش کرنل نقطه ای ۲۵
۱-۸-۲ ضریب تولید و انباشت : ۲۷
۱-۸-۳ چشمه خطی ایزوتروپیک ۳۰
۱-۸-۴ چشمه حجمی استوانه ای با محیط تضعیف کننده ۳۲
۱-۹- دز و آهنگ دز: ۳۵
۱-۱۰- تولید گرما در حفاظ ۳٦
۱-۱۱- معیارهای اصلی ایمنی تابش ۳۹
۱-۱۱-۱ پرتوگیری شغلی ٤۰
۱-۱۱-۲ پرتوگیری افراد جامعه ٤۲
۱-۱۱-۳ پرتو گیری جماعت ٤۲
۱-۱۱-۴ پرتوگیری پزشکی ٤۳
۱-۱۲- طراحی بهینه ٤٤
۱-۱۳- حفاظ گذاری به هنگام تعویض سوخت راکتور ٤۵
فصل ۲- معرفی کدهای به کار رفته (کدهای ORIGEN2 وMCNP) ٤۷
۲-۱- کد ORIGEN ٤۸
۲ -۲ - کد MCNP ٤۹
۲-۲-۱- کارتهای فایل ورودی ۵۱
نحوهٔتعریف کردن هندسه برای کد MCNP ۵۱
۲-۲-۲ روش مونت کارلو ۵۲
۲-۲-۳ روشهای کاهش واریانس ۵۵
فصل ۳- طراحی حفاظ ۵۸
مقدمه: ۵۹
۳-۱- نتایج کد ORIGEN ٦۲

۳-۱-۱ اکتیویته ایزوتوپ ها ٦٢
۳-۱-۲- چشمهٔ فوتونی ٦٤
۳-۱-۳- چشمهٔ نوترونی ٦٥
۳-۲ نتایج مونت کارلو ٦٧
۳-۲-۱ اعمال کاهش واریانس در مونت کارلو ٧٢
۳-۳- ارائه برنامهٔ فرترن و مقایسه با مونت کارلو ٧٥
فصل ۴- پیشنهادات و جمع بندی ٨٧
۴-۱ جمع بندی ٨٨
۴-۲ پیشنهادات ٨٩

فصل ۱ - مبانی حفاظ گذاری

مقدمه:

مطالعه در زمینه حفاظت در برابر پرتو ها مراحلی را در بر دارد که عبارتند از نتقال پرتو در حفاظ، میزان تشعشعات در مجاورت آن ، تولید حرارت در حفاظ، رادیو اکتیو شدن مواد حاضر در حفاظ و محیط اطراف آن، نفوذ پرتو در شیارهای حفاظ، پراکندگی پرتوها در مجاورت حفاظ، انتخاب ماده مناسب به منظور حفاظ گذاری، بهینه سازی شکل و آرایش فضایی حفاظ و جنبه های اقتصادی حفاظ طراحی شده.

برخی پرتوها ممکن است ذرات باردار الکتریکی مانند بتا و آلفا باشند. از آنجائی که این پرتوها با کنده شدن الکترون از اتم در طول عبور پرتو از ماده باعث یونیزاسیون می شوند گاهی مستقیماً یونیزه کننده نامیده می شوند. نوع دیگر پرتوها مانند نوترون ها و فوتون (اشعه گاما و ایکس) باردار نیستند و طی مکانیزم پیچیده تری باعث یونیزاسیون می شوند که در این مورد با ساطع شدن انرژی ذرات باردار ثانویه باعث یونیزاسیون می شوند. نوترون ها و فوتون ها ً ذرات یونیزه کننده به طور غیر مسقیم نامیده می شوند. توانائی یونیزاسیون این ذرات دلیلی است بر اهمیت مطالعه حفاظ گذاری، زیرا اثرات مهم زیان بار بیولوژیکی ناشی از پرتوگیری ارتباط نزدیکی با یونیزه شدن اتم ها در بدن انسان دارد.

تقسیم بندی پرتوها به دو دسته دلیلی بر مطالعه حفاظ گذاری دارد، پرتوهای مستقیماً یونیزه کننده به طور قوی با ماده حفاظ اندر کنش می کنند و به سهولت متوقف می شوند و قدرت نفوذشان قابل اغماض می باشد در حالی که پرتوهای بطور غیر مستقیم یونیزه کننده قدرت نفوذ بالائی دارند و لازم است ماده حفاظ گران و تودهٔ تو پری باشد. بنابراین در طراحی حفاظ فقط

نوترون ها و اشعه های گاما مورد توجه قرار می گیرند. لازم به ذکر است که در راکتورهـای قـدرت مهمترین تشعشعات هسته ای که نیاز به حفاظ گذاری سنگین دارند عبارتند از نوترون های اولیـه، اشعهٔ گامای اولیه، نوترون های حرارتی و اشعهٔ گامای ثانویه.

۱-۱- برهمکنش پرتو با ماده

برهمکنش پرتو با ماده می تواند بر طبق نوع برهمکنش و واحد مـاده ای کـه در آن بـرهمکنش روی می دهد انجام پذیرد، این عمل می تواند با الکترونـی کـه در مـاده آزاد اسـت روی دهـد و یـا ممکن است با هسته های اتمی که گویی در قید ملکول و یا شبکه بلوری نیـستند انجـام شـود. در مواردی که ذره تابشی کم انرژی می باشد انرژی بستگی ملکولی و یا بلـوری بایـد در نظـر گرفتـه شود.

برهمکنش ممکن است پراکندگی باشد، که با زاویه انحراف و تغییـر انـرژی همـراه اسـت ، کـه پراکندگی می تواند الاستیک[1] ویا غیر الاستیک[2] باشد. برای مثال پراکندگی فوتون با الکتـرون آزاد، پراکندگی کامپتون نام دارد که به طور تقریبی کاملاً الاستیک است. در حالیکـه بـرای بـرهمکنش فوتون با الکترونی که در قید اتم می باشد باید غیر الاستیک در نظـر گرفتـه شـود، کـه مقـداری از انرژی، صرف انرژی بستگی الکترون می شود.

دیگر برهمکنش ها جذبی هستند که انرژی پرتو به طور کامل به هسته منتقل می شـود و نتیجه آن ممکن است ساطع شدن یک پرتو خاص باشد. برهمکنش پرتو با ماده در طبیعت همیشه آماری است، بنابراین باید به صورت احتمال درنظر گرفته شود. یک ذره در حال حرکـت در مـاده را در نظر بگیرید و p را احتمال اندرکنش این ذره با ماده فرض مـی کنـیم، $\mu = \lim \frac{p}{\Delta x}$، کـه μ احتمال برهمکنش در واحد طول می باشد و کمیت ثابت برای هر ماده است. و به آن ضریب میرایی

[1] - elastic
[2] - inelastic

خطی می گویند ،تقریباً همیشه از ضریب میرایی خطی با عنوان سطح مقطع ماکروسکوپیک نیز یاد می شود.

ضریب برهمکنش خطی تابعی از انرژی پرتو تابش شده در قبل و بعد از برهمکنش می باشد ، همچنین تابعی از جرم هسته (یا الکترون) پس زده شده و زاویه پراکندگی می باشد که معمولاً آن را به صورت $\mu(E,E',\theta_S)dE'd\Omega$ نشان می دهند که احتمال واکنش ذره با انرژی E در واحد طول است به طوریکه در انرژی E' و $E'+dE'$ و زاویه پراکندگی θ_S در بازه $d\Omega$ ظاهر شود. که روابط زیر حاکم است.

$$\mu(E,E') = \int_{4\pi} d\Omega \mu(E,E',\theta_S) \qquad (۱-۱)$$

$$\mu(E,\theta_S) = \int_0^{\infty} dE' \mu(E,E',\theta_S) \qquad (۱-۲)$$

در اینجا $\mu(E,E')dE'$ احتمال بر واحد طول برای پراکندگی به انرژی E' بدون در نظر گرفتن زاویه و $\mu(E,\theta_S)d\Omega$ ضریب برهمکنش برای پراکندگی در جهت θ_S در حوزه $d\Omega$ بدون در نظر گرفتن انرژی می باشد. و ضریب برهمکنش خطی کل بدون در نظر گرفتن انرژی و زاویه به صورت زیر تعریف می شود.

$$\mu(E) = \int_0^{\infty} dE' \mu(E,E') \qquad (۱-۳)$$

۱-۲- رده بندی برهمکنش فوتون

در امور حفاظت در برابر تابش فوتون، چهار نوع برهمکنش اصلی پرتو گاما را با ماده حائز اهمیت می دانند که عبارتند از: جذب فوتوالکتریک ، پراکندگی کامپتون، تولید زوج و فروپاشی فوتونی می باشد که به توضیح هر یک می پردازیم.

۱-۲-۱- جذب فوتوالکتریک

برهمکنش میان یک فوتون و یک الکترون مقید به اتم را هنگامی که انرژی بستگی مساوی یا کمتر از انرژی فوتون است،اثر فوتوالکتریک می نامیم. در این فرآیند فوتون فرودی به کلی نابود

می شود. ذره یوننده اصلی حاصل از این برهمکنش فوتوالکترون است که انرژی آن از معادله زیر بدست می آید.

$$E_{pe} = hf - \Phi \qquad (۴-۱)$$

انرژی فوتوالکترون عمدتاً در محیط جذب از طریق برانگیزش و یونش ، تلف می شود. انرژی بستگی Φ از طریق تابش فلوئورسانی که در پی برهمکنش اولیه رخ می دهد به محیط جذب منتقل می شود .این فوتون های کم انرژی نیز در نقاطی نه چندان دور از محل تولیدشان، در برهمکنش فوتوالکتریک دیگری شرکت می کنند و جذب الکترون های خارجی می شوند. اثر فوتوالکتریک برای فوتون های کم انرژی و جذب کننده های با اعداد اتمی بالا حائز اهمیت است. سطح مقطع این واکنش به تقریب بر حسب $\sigma_{pe} \alpha \frac{Z^4}{E^3}$ تغییر می کند. همین بستگی شدید جذب فوتوالکتریک به عدد اتمی Z است که سرب را برای حفاظت در برابر پرتوهای X عنصری شایان توجه کرده است.

۱-۲-۲- پراکندگی کامپتون

پراکندگی کامپتون عبارت است از برخوردی کشسان بین یک فوتون و یک الکترون آزاد. در برخورد بین یک فوتون و یک الکترون آزاد ، اگر پایستگی تکانه و انرژی برقرار بماند، امکان ندارد که تمام انرژی فوتون به الکترون منتقل شود. بنابراین چون تمام انرژی فوتون به الکترون منتقل نمی شود لازم است فوتون پراکنده شود و در این حالت فوتون پراکنده دارای انرژی کمتر از فوتون فرودی خواهد بود و تنها اختلاف بین فوتون فرودی و فوتون پراکنده به الکترون آزاد منتقل می شود. مقدار انرژی منتقل شده را می توان با کاربرد قوانین پایستگی انرژی و تکانه به دست آورد. بنابراین با برقراری روابط پایستگی تکانه و انرژی تغییر طول موج فوتون با رابطهٔ (۱-۵) تعریف می شود؛

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) \qquad (۵-۱)$$

θ زاویه پراکندگی فوتون و Φ زاویه پراکندگی الکترون می باشد. رابطه بین زاویه های پراکندگی فوتون و الکترون به صورت رابطهٔ (۱-۶) است.

$$\cot\frac{\theta}{2}=(1+\frac{h}{\lambda m_0 c})\tan\Phi \qquad (۱-۶)$$

الکترون پراکنده در دزسنجی تابش از اهمیت فراوانی برخوردار است، زیرا وسیله انتقال انرژی فوتون پراکنده به محیط جاذب همین الکترون است. الکترون کامپتون انرژیش را به سان یک ذره بتا در ماده از دست می دهد و در میان تولیدات پرتو گاما از ذرات اصلی یونیزه کننده است.

۱-۲-۳- تولید زوج

فوتونی که انرژی اش بیشتر از $1.02MeV$ است ، هنگامی که از نزدیکی یک هسته می گذرد ، ممکن است خود به خود نابود و انرژی اش به صورت یک پوزیترون و یک الکترون پدیدار شود. جرم هر یک از این دو ذره برابر $m_e c^2 = 0.51mev$ و انرژی جنبشی کل آنها با رابطهٔ (۱-۷) داده می شود.

$$T = hf - 2m_e c^2 \qquad (۱-۷)$$

برای حفظ پایستگی تکانه لازم است که این تبدیل انرژی به جرم در حضور یک ذره دیگر نظیر یک هسته، صورت گیرد. انرژی جنبشی هسته پس زده خیلی کم است. بنابراین در عمل می توان گفت که آنچه از انرژی فوتون بعد از تشکیل جرم زوج باقی می ماند، به صورت انرژی جنبشی زوج پدیدار می شود. این پدیده در مجاورت یک الکترون نیز ممکن است صورت گیرد، ولی احتمال وقوع آن در مجاورت هسته بیشتر است. علاوه بر این انرژی آستانه برای تولید زوج در مجاورت الکترون برابر $4m_e c^2$ است. این انرژی آستانه از آن جهت ضروری است که الکترون پس زننده باید با سرعتی بسیار زیاد به طرف عقب پرتاب شود تا پایستگی تکانه برقرار بماند، چون جرم الکترون برابر ذرات تولیدی است انرژی لازم برای پرتاب آن زیاد خواهد بود.

سطح مقطع یا احتمال تولید زوج الکترون_پوزیترون تقریباً متناسب است با (z^2+z)، و از این رو مواد جاذب با عدد اتمی بالاتر اهمیت بیشتری در این مورد خواهند داشت. وقتی انرژی از مقدار آستانه $1.02mev$ تا حدود $5mev$ افزایش یابد سطح مقطع هم به آهستگی افزایش خواهد یافت. پس از تولید زوج ، الکترون_پوزیترون به سمت جلو پرتاب می شوند و انرژی جنبشی شان را همانند هر الکترون پر انرژی دیگر از طریق برانگیزش، یونش و تابش ترمزی از دست می دهند.

۱-۲-۴- فروپاشی فوتونی[1]

در فروپاشی فوتونی، یک فوتون گاما در هسته جاذب گیراندازی می شود و آنگاه در بیشتر موارد یک نوترون از هسته گسیل می شود که فوتو نوترون نامیده می شود. این یک نوع واکنش آستانه ای است که در آن انرژی فوتون باید از کمینه معینی که به هسته جاذب بستگی دارد، بیشتر باشد. این واکنش ، خاص انرژی های بالاست و جز در موارد استثنائی ، نوعی سازوکار جذب برای گامای حاصل از ایزوتوپ های پرتوزا محسوب نمی شود. برای فوتون های بسیار پر انرژی حاصل از شتاب دهنده های الکترون ، نظیر بتا ترون ها و سنکترون.ها فروپاشی فوتونی به تولید نوترون منجر می شود . به طور کلی سطح مقطع فروپاشی فوتونی خیلی کوچکتر از سطح مقطع کل است. و در مواردی که آب سنگین و برلیوم موجود می باشد این واکنش مهم می شود.

۱-۳- رده بندی برهمکنش های نوترون

به طور کلی برهمکنش نوترون با ماده با برهمکنش فوتون با ماده متفاوت است ، اغلب فوتون ها با الکترون های اتمی برهمکنش می کنند در حالیکه نوترون ها اساساً با هسته های اتم واکنش می کنند. البته برهمکنش نوترون ـ الکترون هم رخ می دهد ولی در مقایسه با برهمکنش نوترون ـ هسته قابل صرف نظر کردن است. سطح مقاطع فقط با انرژی نوترون ها تغییرات سریعی ندارند بلکه به طور نامنظمی از یک عنصر به عنصر دیگر متفاوت است حتی برای ایزوتوپ های یک

[1]- photon capture

عنصر نیز متفاوت می باشد و همه سطح مقاطع تجربی هستند. در ۳۰ سال گذشته تلاش و هزینه زیادی برای به دست آوردن سطح مقاطع نوترون برای برهمکنش های متفاوت صرف شده است.

به منظور رده بندی هسته ها معمولاً به سه نوع تقسیم می شوند؛ هسته های سبک (عدد جرمی <۲۵) ، هسته های متوسط (۲۵<عدد جرمی <۱۵۰)،هسته های سنگین (عدد جرمی >۱۵۰) . برای هسته های سبک و هسته های با عدد جادوئی سطح مقطع در انرژی پائین از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma_t = c_1 + \frac{c_2}{\sqrt{E}} \qquad (۱۰-۱)$$

Eانرژی نوترون ، c_1 و c_2 ضرایب ثابتند ، دو جمله سمت راست به ترتیب سهم پراکندگی کشسان و اندرکنش جذب را نشان می دهد. عناصر سبک هیدروژن و ایزوتوپ های آن هیچ رزونانسی ندارند و تا ناحیه MeV سطح مقطع آن ها ثابت است و آن گاه شروع به کاهش می کند. و از این رو هیدروژن کاربرد زیادی در حفاظ گذاری نوترون تند دارد.

برای هسته های سنگین سطح مقطع کل ممکن است رفتار $\frac{1}{\sqrt{E}}$ را در انرژی کم نشان ندهد . رزونانس ها در انرژی پایین تر ظاهر می شوند (در ناحیه ev) و پهنای بسیار باریکی دارند با پیک های بلند و در بالای انرژی $1kev$ رزونانس ها آن قدر به هم نزدیکند و آنقدر باریکند که از هم قابل تشخیص نیستند.

هسته های متوسط رفتاری ما بین هسته های سبک و هسته های سنگین دارند. رزونانس ها در ناحیه 100 ev تا چند kev پدیدار می شوند و رزونانس ها به باریکی و بلندی هسته های سنگین نیستند .

در انرژی های بالا مهمترین برهمکنش نوترون پراکندگی است و معمولاً پراکندگی کشسان مهم تر است. و سطح مقطع جذب برای همه هسته ها در مقایسه با باقی واکنش ها کوچک است جز برای ناحیه انرژی حرارتی. و تولید ذرات باردار $[(n,p)(n,\alpha)...]$ برای عناصر سبک مهم

است و برای عناصر متوسط و سنگین تولید ذرات باردار سهم کوچکی در برهمکنش ناکشسان کلی دارد و می توان از آن صرف نظر کرد.

دو نوع پراکندگی برای نوترون ها وجود دارد ،که هر دوی آن ها برای حفاظ گذاری نوترون های تند مهم هستند. پراکندگی گیر اندازی، که نوترون ها توسط هسته های پراکنده شده جذب می شوند و یک هسته مرکب تشکیل می شود و سپس یک نوترون گسیل می شود اگر هسته باقی مانده در حالت تعادل باشد پراکندگی کشسان است و اگر در حالت تحریک باشد پراکندگی ناکشسان است ، و سطح مقطع آن رزونانسی است .

نوع دیگر پراکندگی ، پراکندگی پتانسیل است، این نوع پراکندگی همیشه کشسان است و نوترون ها با هسته ها پراکنده می شوند که گویی پراش موج نوترون توسط پتانسیل هسته ای رخ داده است. و سطح مقطع آن به آرامی با انرژی تغییر می کند.

۱-۴- چشمه های نوترونی

۱-۴-۱- نوترون های حاصل از شکافت

اغلب هسته های سنگین با جذب یک نوترون ،یا گاهی به طور خودبه خود نوترون تولید می کنند، این نوترون های شکافت در مسائل حفاظ گذاری به دلیل آسیب زیستی حاصل از تابش بسیار مهم هستند. تقریباً همهٔ نوترون های تند حاصل از شکافت در طی چند میکرو ثانیه بعد از شکافت تولید می شوند و تنها بخش کوچکی (کمتر از ۱٪) از نوترون های شکافت به عنوان نوترون های تأخیری در چند ثانیه تا نزدیک یک دقیقه بعد از شکافت تولید می شوند. که انرژی این نوترون های تأخیری کمتر از نوترون های آنی است و در مسائل حفاظ گذاری از اهمیت کمتری برخوردار است. اگر انرژی نوترونی که باعث شکافت می شود افزایش یابد آن گاه تعداد متوسط نوترون تولیدی حاصل از یک شکافت افزایش می یابد. که این مقدار در جدول(۱-۱) برای ۴ هسته قابل شکافت مهم آورده شده است. همچنین از آنجایی که در راکتور ایزوتوپ هایی با عدد اتمی

بالاتر از اورانیوم تولید می شوند احتمال شکافت خود به خود نیز خواهیم داشت. تعداد نوترون های آنی تولید شده در راکتوری که در توان P کار می کند برابر است با:

$$N_{PN} = P(watt) \times 3.1 \times 10^{10} \left({}^{\text{Fission}}/_{\text{Watt-Sec}} \right) \times 2.54 \left({}^{\text{Neutron}}/_{\text{Fission}} \right)$$

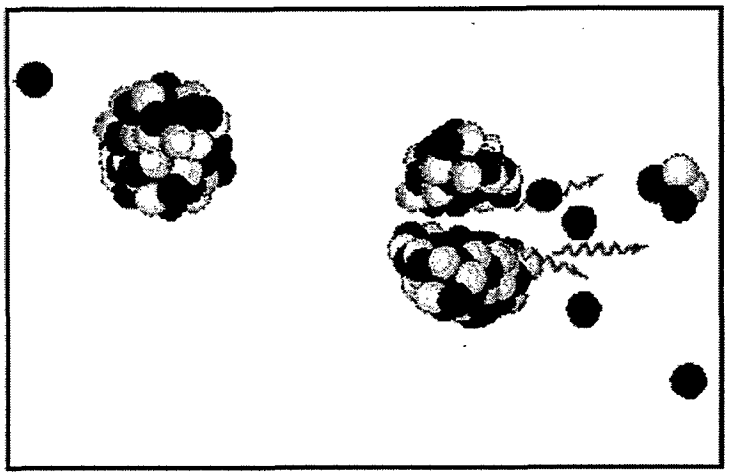
$$N_{PN} = \text{P} \times 7.75\text{E}10 \quad {}^{\text{Neutron}}/_{\text{Sec}} \qquad (۱۱-۱)$$

همه هسته های قابل شکافت یک توزیعی از انرژی نوترون های آنی تولید می کنندکه از صفر تا انرژی های بالا را در بر می گیرد و در انرژی های بالا فرمول تجربی (۱-۱۲) برای آن صدق می کند که به صورت زیر است:

$$\chi(\text{E}) = 0.4527 \text{e}^{-\frac{\text{E}}{0.965}} \sin\sqrt{2.29\text{E}} \qquad 0 < E < 20MeV \qquad (۱۲-۱)$$

جدول (۱-۱): تعداد متوسط نوترون تولید شده در اثر یک شکافت برای عناصر موجود در جدول[۱]

FISSIN SPECIES	$\bar{\nu}(E_n)$	E_n range MeV
U^{235}	$\bar{\nu} = 2.349+0.150\ \text{E}_\text{n}$ $\bar{\nu} = 2.432+0.066\ \text{E}_\text{n}$	$0 \le \text{E}_\text{n} \le 1$ $\text{E}_\text{n} > 1$
Pu^{239}	$\bar{\nu} = 2.907+0.133\ \text{E}_\text{n}$ $\bar{\nu} = 2.867+0.148\ \text{E}_\text{n}$	$0 \le E_n \le 1$ $E_n > 1$
U^{238}	$\bar{\nu} = 2.304+0.160\ \text{E}_\text{n}$	$E_n \ge 1.5$
Th^{239}	$\bar{\nu} = 1.873+0.164\ \text{E}_\text{n}$	$E_n \ge 1.4$



Fission

شکل(۱-۱): شمائی از واکنش شکافت

۱-۴-۲- نوترون های حاصل از برهمکنش (α,n)

در بسیاری از آزمایشگاه ها برای چشمه نـوترونی متـراکم از ذرات آلفـای حاصـل از رادیـو ایزوتوپ ها، استفاده می شود تا برهمکنش (α,n) در یک ماده مناسب القاء شود. اگر بمباران ذرات آلفا، انرژی کافی داشته باشد تعداد زیادی از هسته ها نوترون تولید می کننـد. انـرژی ذرات آلفـای حاصل از رادیوایزوتوپ ها تنها توانائی نفوذ از سد پتانسیل هسته های سبک را دارند. و این واکـنش گرمازاست یا حداقل یک انرژی آستانه کمی دارد. بنابراین چشمه این نوترون، می توانـد ترکیبـی از ایزوتوپ تبدیل کننده سبک و رادیو ایزوتوپ گسیل کننده ذرات آلفای پر انرژی باشد. بیشتر گسیل کننده های آلفا عناصر آکتینیدها هستند که معمولاً با مـاده برلیـوم ترکیـب خـوبی بـرای چـشمه نوترونی می باشند. در اینجا طیف انرژی نوترون ها پیوسته است. قابل ذکر است کـه هرگـاه انـرژی ذرات آلفا افزایش یابد، کسر نوترون های گسیل شده از واکـنش بیـشتر شـده و همچنـین احتمـال اینکه هسته های تولید شده در حالت برانگیخته بمانند، افزایش می یابد.