



رساله برای دریافت درجهی دکترای تخصصی
در رشتهی فیزیک گرایش هسته‌ای

عنوان:

**بررسی تجربی و نظری خواص بازتابندگی گرافیت، آب، پلی‌اتیلن و سرب برای
نوترون‌های حرارتی**

اساتید راهنما:

دکتر فرهاد ذوالفقارپور

دکتر فرهود ضیائی

استاد مشاور

دکتر مقصود سعادت‌ی

پژوهشگر:

سارا عظیم‌خانی

بهار 1397

نام خانوادگی دانشجو: عظیم‌خانی	نام: سارا
عنوان رساله: بررسی تجربی و نظری خواص بازتابندگی گرافیت، آب، پلی‌اتیلن و سرب برای نوترون‌های حرارتی	
اساتید راهنما: دکتر فرهاد ذوالفقارپور و دکتر فرهود ضیائی	
استاد مشاور: دکتر مقصود سعادت	
مقطع تحصیلی: دکترای تخصصی	رشته: فیزیک
گرایش: هسته‌ای	دانشگاه: محقق اردبیلی
دانشکده: علوم پایه	تاریخ دفاع: 1397/3/13
تعداد صفحات: 102	
چکیده:	
<p>محاسبات ترابرد نوترون در فناوری‌های هسته‌ای از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از بخش‌های مهم در رآکتورهای هسته‌ای و سامانه‌های نوترون‌درمانی، بازتابنده است. بکارگیری یک بازتابنده‌ی مناسب می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از فرار نوترون‌ها داشته باشد. نتیجه‌ی بازتاب، میزان شار نوترون در محل تابش‌دهی افزایش می‌یابد. بنابراین بازتابنده به طور غیر مستقیم به کاهش جرم بحرانی کمک می‌کند. تعیین جنس و برآورد ضخامت مناسب برای بازتابنده از اهمیت زیادی در سامانه‌های نوترونی برخوردار است. در این پایان‌نامه ابتدا با استفاده از معادله‌ی پخش نوترون، معادلات مربوط به ضریب آلبودی بازتابنده‌های تک ماده‌ای و دو ماده‌ای در انرژی نوترون‌های حرارتی استخراج و ضرایب بازتاب نوترون برای ضخامت‌های مختلفی از آب، پلی‌اتیلن، سرب و گرافیت و ترکیب دو ماده‌ای آن‌ها محاسبه شد. در مرحله‌ی دوم، با استفاده از کد MCNPX هندسه‌ی مورد نظر شبیه‌سازی شده و موقعیت مناسب آشکارساز، چشمه، کندکننده و بازتابنده برآورد شده و با تغییر مواد و ضخامت بازتابنده‌های مورد استفاده، میزان شار نوترون، جابجایی طیفی و پارامترهای بازتاب نوترون‌های حرارتی با استفاده از این کد به دست آمد. با کمک نتایج شبیه‌سازی، هندسه‌ی مناسب برای آزمایش تجربی طراحی گردید. اجزای مورد استفاده شامل چشمه‌ی نوترونی $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ با اکتیویته‌ی $5/2 \text{ Ci}$، آشکارساز BF_3، جاذب کادمیومی، کندکننده‌ی آب، حفاظ سربی، پایه‌ی آهنی و بازتابنده‌های آب، پلی‌اتیلن، گرافیت و سرب با ضخامت‌های مختلف است. میزان شار نوترون‌های حرارتی حاصل از چشمه‌ی $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ پس از بازتاب از ضخامت‌های مختلف بازتابنده‌های تک ماده‌ای و دو ماده‌ای توسط آشکارساز BF_3 اندازه‌گیری و ضریب آلبود، پارامتر بازتاب و سطح مقطع بازتاب نوترون‌های حرارتی برای هر کدام از آن‌ها به دست آمد. در نهایت نتایج حاصل از سه مرحله با یکدیگر مقایسه و با توجه به میزان ضریب بازتاب و جابجایی طیفی، ضخامت و ماده مناسب برای بازتابنده‌ی نوترون‌های حرارتی تعیین گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین ضریب آلبود برای بازتابنده‌ی پلی‌اتیلن با ضخامت 8 cm به دست آمد. در بازتابنده‌ی دو ماده‌ای، در صورتی که ماده دوم دارای ضریب آلبودی بیشتری باشد بهبود عملکرد بازتابنده حاصل می‌شود.</p>	
کلید واژه‌ها: آشکارسازی نوترون، بازتابنده‌ی نوترون، ترابرد نوترون، ضریب آلبود، نوترون‌های حرارتی	

فهرست مطالب

شماره و عنوان مطالب	صفحه
---------------------	------

فصل اول: کلیات پژوهش

1-1- مقدمه	2
2-1- بیان مسأله	2

3-1- پیشینه‌ی پژوهش

10.....

4-1- ضرورت و اهمیت پژوهش

12.....

5-1- فرضیه‌ها و اهداف پژوهش

13.....

فصل دوم: مبانی نظری پژوهش

1-2- مقدمه

16.....

2-2- خواص نوترون

16.....

3-2- گروه‌بندی نوترون

17.....

4-2- سطح مقطع نوترون

17.....

2-4-1- سطح مقطع میکروسکوپی

18.....

2-4-2- سطح مقطع ماکروسکوپی

21.....

2-4-3- سطح مقطع مواد مرکب

21.....

2-5-5- چشمه‌های نوترون

22.....

2-5-1- شکافت خودبه‌خودی

22.....

2-5-2- چشمه‌های رادیوایزوتوپی (α, n)

23.....

2-5-3- چشمه‌های فوتو نوترون

23.....

2-5-4- چشمه‌های مولد نوترون

23.....

2-5-5- رآکتورهای هسته‌ای

24.....

2-5-6- چشمه‌های نوترونی اسپالاسیونی

24.....

2-6-6- لتارژی

25.....

27..... 2-7-7- ترابرد نوترون

2-8-8- روش مونت کارلو

29.....

2-9-9- ضریب آلبدو

30.....

10-2- پارامتر بازتاب

33.....

11-2- خطاها

35.....

فصل سوم: مراحل انجام پژوهش

1-3- مقدمه

38.....

2-3- روش کار

38.....

1-2-3- محاسبات نظری با استفاده از معادله‌ی پخش نوترون

39.....

2-2-3- شبیه‌سازی با استفاده از کد MCNPX

40.....

3-2-3- آزمایش تجربی

44.....

47..... 3-3- مواد مورد استفاده

1-3-3- چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$

47.....

2-3-3- کندکننده‌ی نوترونی

50.....

3-3-3- حفاظ

51.....

4-3-3- پایه‌ی نگهدارنده‌ی بازتابنده

52.....

3-3-5- جاذب نوترونی

52.....

3-3-6- مواد بازتابنده

54.....

3-3-6-1- آب

54.....

3-3-6-2- گرافیت

55.....

3-3-6-3- پلی اتیلن

56.....

3-3-6-4- سرب

57.....

3-3-7- آشکارساز BF_3

58.....

3-3-8- تحلیل گر چند کاناله MCA

64.....

فصل چهارم: نتایج و یافته‌های پژوهش

4-1- مقدمه

66.....

4-2- بازتابنده‌های تک ماده‌ای

66.....

4-3- جابه‌جایی طیفی

71.....

4-4- بازتابنده‌های دو ماده‌ای

73.....

4-5- نتایج حاصل از معادله‌ی پخش نوترون

84.....

فصل پنجم: بحث و نتیجه‌گیری

5-1- مقدمه

90.....

5-2- تحلیل یافته‌های پژوهش 90.....

5-3- نتیجه‌گیری 95.....

5-4- پیشنهادها

97.....

98..... فهرست منابع و مأخذ

فهرست جدول‌ها

شماره و عنوان جدول	صفحه
--------------------	------

- جدول 1 - 1: پارامترهای کندسازی نوترون برای مواد مختلف 6
- جدول 1 - 2: توان و نسبت کندسازی نوترون برای کندکننده‌های رایج 8
- جدول 3 - 1: سطح مقطع، ضریب پخش و طول پخش بازتابنده‌ها 39
- جدول 3 - 2: فراوانی ایزوتوپ‌های کادمیوم طبیعی 53
- جدول 3 - 3: فراوانی ایزوتوپ‌های سرب طبیعی 57
- جدول 4 - 1: سطح مقطع نوترون‌های حرارتی و ضخامت‌های اشباع بازتابنده‌های تک ماده‌ای 71
- جدول 4 - 2: چگالی و ضخامت‌های اشباع ماده‌ی دوم در بازتابنده‌های دو ماده‌ای 81
- جدول 4 - 3: ثابت‌های رابطه‌ی مربوط به ضریب آلدوی بازتابنده‌های تک ماده‌ای 85
- جدول 4 - 4: ثابت‌های رابطه‌ی مربوط به ضریب آلدوی بازتابنده‌های دو ماده‌ای 88

فهرست شکل‌ها

شماره و عنوان شکل	صفحه
شکل 1 - 1: چگالی برخورد نوترون در فرآیند کندسازی	7
شکل 1 - 2: طرح کندسازی چشمه‌ی نوترونی	9
شکل 2 - 1: سطوح مقاطع هیدروژن	19
شکل 2 - 2: سطوح مقاطع اکسیژن	19
شکل 2 - 3: سطوح مقاطع کربن	20
شکل 2 - 4: سطوح مقاطع سرب 208	20
شکل 2 - 5: تغییرات انرژی نوترون بر حسب تغییرات انرژی	26
شکل 3 - 1: توزیع احتمال انرژی نوترون‌های حاصل از چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$	42
شکل 3 - 2: هندسه‌ی طراحی شده توسط کد MCNPX	43
شکل 3 - 3: چیدمان آزمایش بازتاب نوترون‌های حرارتی	44
شکل 3 - 4: تصویر آزمایش پرتودهی به بازتابنده‌ی تک ماده‌ای	45
شکل 3 - 5: تصویر آزمایش پرتودهی به بازتابنده‌ی دو ماده‌ای	46
شکل 3 - 6: بهره‌ی تولید نوترون‌ها بر حسب انرژی ذره‌ی آلفای فرودی بر برلیوم	48
شکل 3 - 7: نمودار واپاشی ^{241}Am	49
شکل 3 - 8: چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ مورد استفاده در آزمایش تجربی	50
شکل 3 - 9: چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ در فاصله‌ی 10 cm از دیواره‌ی مخزن	51
شکل 3 - 10: سطوح مقاطع کادمیوم طبیعی	53
شکل 3 - 11: شیشه‌ی مورد استفاده در آزمایش تجربی	55
شکل 3 - 12: لایه‌های گرافیت مورد استفاده در آزمایش تجربی	56
شکل 3 - 13: لایه‌های پلی‌اتیلن مورد استفاده در آزمایش تجربی	57
شکل 3 - 14: لایه‌های سرب مورد استفاده در آزمایش تجربی	58

- شکل 3 – 15: سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای مورد توجه در آشکارسازی نوترون 59
- شکل 3 – 16: طیف ارتفاع پالس مورد انتظار از شمارنده‌ی BF_3 با ابعاد بزرگ 60
- شکل 3 – 17: طیف ارتفاع پالس مورد انتظار از شمارنده‌ی BF_3 60
- شکل 3 – 18: میزان انرژی ذخیره شده در شمارنده‌ی BF_3 در صورت برخورد ذره‌ی آلفا به دیواره 61
- شکل 3 – 19: احتمال توزیع انرژی در شمارنده‌ی BF_3 در صورت برخورد ذره‌ی آلفا به دیواره 62
- شکل 3 – 20: احتمال توزیع انرژی در شمارنده‌ی BF_3 در صورت برخورد ذره‌ی ${}^7\text{Li}$ به دیواره 62
- شکل 3 – 21: احتمال توزیع انرژی در شمارنده‌ی BF_3 در صورت برخورد ذره‌ی آلفا و ${}^7\text{Li}$ به دیواره 62
- شکل 4 – 1: طیف ارتفاع پالس بازتابنده‌های تک ماده‌ای 67
- شکل 4 – 2: شمارش نوترون‌های حرارتی بازتابنده‌های تک ماده‌ای 68
- شکل 4 – 3: ضرایب آبدوی نوترون‌های حرارتی برای بازتابنده‌های تک ماده‌ای 69
- شکل 4 – 4: پارامتر بازتاب نوترون‌های حرارتی برای بازتابنده‌های تک ماده‌ای 70
- شکل 4 – 5: طیف انرژی نوترون‌های جابه‌جا شده در اثر کندسازی 71
- شکل 4 – 6: تارژی بر حسب انرژی نوترون 72
- شکل 4 – 7: میانگین تارژی نوترون‌های بازتابی از بازتابنده‌ها 73
- شکل 4 – 8: طیف ارتفاع پالس بازتابنده‌های دو ماده‌ای (آب ماده‌ی اول) 74
- شکل 4 – 9: طیف ارتفاع پالس بازتابنده‌های دو ماده‌ای (پلی‌اتیلن ماده‌ی اول) 74
- شکل 4 – 10: طیف ارتفاع پالس بازتابنده‌های دو ماده‌ای (سرب ماده‌ی اول) 75
- شکل 4 – 11: طیف ارتفاع پالس بازتابنده‌های دو ماده‌ای (گرافیت ماده‌ی اول) 75
- شکل 4 – 12: شمارش نوترون‌های حرارتی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (آب ماده‌ی اول) 76
- شکل 4 – 13: شمارش نوترون‌های حرارتی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (پلی‌اتیلن ماده‌ی اول) 77
- شکل 4 – 14: شمارش نوترون‌های حرارتی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (سرب ماده‌ی اول) 77
- شکل 4 – 15: شمارش نوترون‌های حرارتی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (گرافیت ماده‌ی اول) 78
- شکل 4 – 16: ضرایب آبدوی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (آب ماده‌ی اول) 79
- شکل 4 – 17: ضرایب آبدوی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (پلی‌اتیلن ماده‌ی اول) 79
- شکل 4 – 18: ضرایب آبدوی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (سرب ماده‌ی اول) 80
- شکل 4 – 19: ضرایب آبدوی بازتابنده‌های دو ماده‌ای (گرافیت ماده‌ی اول) 80

- شکل 4 - 20: پارامتر بازتاب بازتابنده‌های دو ماده‌ای (آب ماده‌ی اول) 82
- شکل 4 - 21: پارامتر بازتاب بازتابنده‌های دو ماده‌ای (پلی‌اتیلن ماده‌ی اول) 82
- شکل 4 - 22: پارامتر بازتاب بازتابنده‌های دو ماده‌ای (سرب ماده‌ی اول) 83
- شکل 4 - 23: پارامتر بازتاب بازتابنده‌های دو ماده‌ای (گرافیت ماده‌ی اول) 83
- شکل 4 - 24: ضرایب آلبدوی بازتابنده‌ی تک ماده‌ای حاصل از معادله‌ی پخش 85
- شکل 4 - 25: ضرایب آلبدوی بازتابنده‌ی دو ماده‌ای حاصل از معادله‌ی پخش (آب ماده‌ی اول) 86
- شکل 4 - 26: ضرایب آلبدوی بازتابنده‌ی دو ماده‌ای حاصل از معادله‌ی پخش (پلی‌اتیلن ماده‌ی اول) 86
- شکل 4 - 27: ضرایب آلبدوی بازتابنده‌ی دو ماده‌ای حاصل از معادله‌ی پخش (سرب ماده‌ی اول) 87
- شکل 4 - 28: ضرایب آلبدوی بازتابنده‌ی دو ماده‌ای حاصل از معادله‌ی پخش (گرافیت ماده‌ی اول) 87

فصل اول:

کلیات پژوهش

1-1- مقدمه

در تمامی سامانه‌های هسته‌ای که کارکرد آن‌ها بر اساس چشمه و شار نوترونی است، مسأله‌ی بازتاب از اهمیت خاصی برخوردار است. پراکندگی، بازتاب و انتقال نوترون در آنالیز شیمیایی نمونه‌های حجمی به ویژه تعیین هیدروژن و میزان رطوبت در مواد مختلف، دزیمتری نوترون‌ها، نوترون‌درمانی، آشکارسازی مواد معدنی و مواد منفجره و رآکتورها به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مواردی که شار نوترون‌ها ناکافی باشد با استفاده از یک بازتابنده‌ی مناسب می‌توان به باریکه‌ی نوترونی با شار مطلوب در محل تابش‌دهی دست یافت. همچنین بکارگیری یک بازتابنده‌ی مناسب می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از فرار نوترون‌ها، کاهش جرم بحرانی و حفظ واکنش زنجیره‌ای داشته باشد. میزان بازتاب نوترون‌ها به ترکیبات ماده‌ی بازتابنده و شرایط هندسی اندازه‌گیری بستگی دارد. فرآیند بازتاب نوترون‌ها بر مبنای کندسازی نوترون‌ها است. در این فصل، انواع واکنش‌های نوترون با هسته‌های محیط، مفهوم کندسازی نوترون، روش‌های مختلف کندسازی و عناصر مورد توجه در کندسازی و بازتاب نوترون‌ها بیان شده‌اند. همچنین اهداف، پیشینه‌ی تحقیق و ضرورت بررسی بازتابنده‌های نوترونی توضیح داده شده‌اند.

1-2- بیان مسأله

کندکننده و بازتابنده دو مؤلفه‌ی مهم در رآکتورهای هسته‌ای برای حفظ واکنش زنجیره‌ای هستند. با توجه به این‌که شکافت توسط نوترون‌های سریع ($1-2 \text{ MeV}$) یا نوترون‌های حرارتی ($0/025 \text{ eV}$) رخ می‌دهد، رآکتورها به دو نوع رآکتورهای سریع و حرارتی طبقه‌بندی می‌شوند. در رآکتورهای حرارتی از ماده‌ی کندکننده برای کندسازی نوترون‌های شکافت استفاده می‌شود، ولی در رآکتورهای سریع از نوترون‌های سریع استفاده می‌شود (Buschow, 2001). کندسازی فرآیند کاهش انرژی جنبشی نوترون‌های آزاد است. به دلیل پایستگی انرژی، این کاهش انرژی جنبشی نوترون‌ها با انتقال انرژی به ماده‌ای که به عنوان کندکننده شناخته می‌شود، انجام می‌گیرد. کندکننده به عنوان کاهنده سرعت نوترون نیز شناخته می‌شود چون همزمان با کاهش انرژی، سرعت نیز کاهش می‌یابد. برهمکنش‌های نوترون با ذرات باردار را به دو بخش عمده‌ی پراکندگی و جذب تقسیم می‌کنند. مهمترین برهمکنش‌ها برای نوترون‌های کند، پراکندگی کشسان با هسته‌های ماده‌ی جاذب و واکنش‌های القا شده توسط نوترون است که قادر به تولید تابش‌های ثانویه با انرژی کافی برای آشکارسازی مستقیم باشند. با توجه به این‌که انرژی نوترون فرودی بسیار پایین است برای امکان‌پذیر بودن این واکنش‌ها به لحاظ انرژی باید Q واکنش مثبت باشد. همچنین به دلیل انرژی جنبشی

پایین نوترون‌های کند، انرژی بسیار کمی در پراکندگی کشسان به هسته‌های جاذب منتقل می‌شود. در برخی موارد، واکنش گیراندازی تابشی یا همان واکنش (n, γ) محتمل‌ترین برهمکنش است و نقش مهمی را در تضعیف یا حفاظسازی در برابر نوترون‌ها دارد. نوترون‌های سریع ابتدا در اثر برخورد کشسان با اتم‌های محیط انرژی خود را از دست می‌دهند و پس از کند شدن و رسیدن به انرژی حرارتی یا نزدیک آن، توسط هسته‌های ماده‌ی جاذب جذب می‌شوند. مؤثرترین کندساز هیدروژن است به دلیل این که نوترون می‌تواند تمام انرژی خود را طی یک برخورد با یک هسته‌ی هیدروژن از دست بدهد (Cacuci, 2010). برای هسته‌های سنگین‌تر، انتقال بخشی از انرژی امکان‌پذیر است. واکنش‌هایی که نوترون با هسته‌های محیط انجام می‌دهد و منجر به انتقال انرژی می‌شوند عبارتند از:

1- جذب: فرآیند جذب نوترون در هسته‌ها مربوط به بخشی از نوترون‌ها است که از باریکه‌ی نوترون حذف می‌شوند و به سطح مقطع ایزوتوپ مورد اصابت بستگی دارد. جذب شامل واکنش‌های گیراندازی و شکافت است. برای نوترون‌های با انرژی بیشتر از 10^5 eV واکنش‌های زیادی مانند (n, p) ، (n, α) و $(n, 2n)$ امکان‌پذیر است ولی علت اصلی حذف نوترون‌های کند، فوق حرارتی و حرارتی گیراندازی (n, γ) است. در سطح مقطع این واکنش‌های گیراندازی تشدیدهایی نیز ممکن است ایجاد شود که در آن مقدار سطح مقطع خیلی بزرگ می‌شود. در خارج از ناحیه‌ی تشدید، سطح مقطع با افزایش سرعت به شکل $\frac{1}{v}$ کاهش می‌یابد (Knoll, 2000). بنابراین همان طوری که نوترون‌ها در اثر فرآیندهای پراکندگی کشسان و ناکشسان کند می‌شوند، احتمال فرآیند جذب بیشتر می‌شود. نوترون‌های سریع در اثر برخورد‌های پراکندگی با موادی با عدد اتمی پایین انرژی خود را از دست می‌دهند و هر چه به انرژی‌های حرارتی نزدیکتر می‌شوند احتمال واکنش گیراندازی آن‌ها توسط هسته‌ی جاذب بیشتر می‌شود. اگر برهمکنش به صورت گیراندازی نوترون باشد، نوترون ناپدید می‌شود اما پس از واکنش، یک یا تعداد بیشتری ذره‌ی دیگر ظاهر می‌شوند و هویت ماده‌ی جاذب عوض می‌شود. در فرآیند جذب، نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی جذب هسته‌ی هدف شده و حاصل آن پرتوی گاما، پروتون یا ذره‌ی آلفا خواهد بود. هسته‌ی حاصل از برخورد نیز ممکن است پرتوزا باشد. در فرآیند شکافت نیز نوترون حرارتی یا سریع جذب یک اتم سنگین مانند ^{238}U یا ^{239}Pu شده و آن را به دو پاره‌ی سبکتر و تعدادی نوترون و ذرات باردار تقسیم می‌کند، این نوع برخورد در تولید نوترون در رآکتورهای هسته‌ای اهمیت دارد. همچنین ممکن است برخورد به گونه‌ای باشد که نوترون‌های سریع جذب هسته‌ی هدف شده و هسته‌ی مرکب تشکیل شود. سپس این هسته تقسیم شده و پاره‌های هسته‌ای و نوترون و فوتون تولید شوند. چند مثال از واکنش‌های جذب به صورت زیر است:

$$n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z-1}X + p \quad \text{واکنش (n, p)}$$

$$n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A-4}{Z-2}X + \frac{4}{2}\alpha \quad \text{واکنش (n, } \alpha \text{)}$$

$$n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A-1}{Z}X + 2n \quad \text{واکنش (n, 2n)}$$

$$n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A+1}{Z}X + \gamma \quad \text{واکنش (n, } \gamma \text{)}$$

$$n + \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A_1}{Z_1}X + \frac{A_2}{Z_2}X + n + n + \dots \quad \text{شکافت}$$

یکی از ویژگی‌های قابل توجه برهمکنش‌هایی که از طریق هسته‌ی مرکب انجام می‌گیرد این است که سطوح مقاطع آن‌ها بیشینه‌هایی در انرژی‌های نوترون فرودی خاصی نشان می‌دهند. چنین بیشینه‌هایی تشدید نامیده می‌شوند. هسته‌ها دارای ترازهای برانگیخته‌ی مختلفی هستند که مربوط به پیکربندی مختلف نوکلئون‌ها در هسته‌ها هستند. اگر انرژی نوترون فرودی به اندازه‌ای باشد که هسته‌ی مرکب در یکی از ترازهای برانگیخته قرار گیرد، احتمال ترکیب نوترون با هسته خیلی زیاد می‌شود.

شدت نوترون‌های تک انرژی طی عبور از ماده‌ای با ضخامت x طبق رابطه‌ی نمایی زیر کاهش می‌یابد (Lamarsh & Barata, 2001):

$$I = I_0 e^{-\sigma_t n x}, \quad (1-1)$$

در رابطه‌ی (1-1)، I_0 شدت اولیه‌ی نوترون‌ها، σ_t سطح مقطع کل نوترون‌ها و n تعداد اتم‌های ماده در واحد حجم است. جذب، نوترون‌ها را از باریکه جدا می‌کند و بنابراین در تضعیف باریکه سهم دارد. میزان جذب نوترون‌ها توسط هسته‌های مواد کم است. در بیشتر مواد نوترون‌ها در ماده نفوذ می‌کنند. هرچند سطح مقطع جذب نوترون برای Li ، B ، Cd و Gd قابل توجه است که استفاده‌ی خوبی در ساخت شمارنده‌ها و حفاظ نوترون دارند.

2- پراکندگی کشسان: در پراکندگی کشسان، انرژی مطابق با رابطه‌ی زیر به هسته‌ی مورد اصابت انتقال می‌یابد (Lamarsh, 1999):

$$\Delta E = E - E' = E - E \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{(1+A)^2} = E \frac{4A \sin^2(\frac{\theta}{2})}{(1+A)^2}, \quad (2-1)$$

در رابطه‌ی (2-1)، A عدد جرمی هسته، θ زاویه‌ی پراکندگی در دستگاه مرکز جرم و E' و E انرژی نوترون قبل و بعد از برخورد در دستگاه آزمایشگاه است. در نبود پراکندگی ($\theta = 0$) اتلافی صورت نمی‌گیرد ($E = E'$) و در 180° $\theta =$ بیشترین اتلاف صورت می‌گیرد که برابر است با:

$$\Delta E = \frac{4A}{(1+A)^2} E, \quad (3-1)$$

مطابق با رابطه‌ی (3-1) برای پراکندگی حاصل از هیدروژن ($A = 1$)، نوترون تمام انرژی خود را به پروتون مورد برخورد می‌دهد ($\Delta E = E$). بنابراین به ازای یک زاویه‌ی مشخص، در صورتی که نوترون با هدف‌هایی با جرم کمتر برخورد کند بیشترین انتقال انرژی صورت می‌گیرد. مشاهده می‌شود طبق رابطه‌ی (3-1) سهم پراکندگی کشسان در انتقال انرژی در تک برخورد نوترون با هسته‌های سنگین ناچیز است ($\lim_{A \rightarrow \text{بزرگ}} \Delta E \simeq 0$).

در برهمکنش پراکندگی، نوترون با یک هسته برهمکنش می‌کند اما هر دو ذره پس از واکنش دوباره ظاهر می‌شوند و هویت ماده‌ی جاذب تغییر نمی‌یابد. یک برخورد پراکندگی را به صورت $n + \frac{A}{2}X \rightarrow \frac{A}{2}X + n$ یا به صورت یک واکنش (n, n) نمایش می‌دهند. واکنش‌های پراکندگی عامل کندسازی نوترون در رآکتورها هستند. محتمل‌ترین برهمکنش بین نوترون‌های سریع و مواد با عدد اتمی پایین، پراکندگی کشسان است. در پراکندگی کشسان انرژی جنبشی کل دو ذره‌ی برخورد کننده پایسته است و انرژی جنبشی بین دو ذره باز توزیع می‌شود. نوترون‌ها بخشی از انرژی خود را به هسته‌ی اتم منتقل کرده و موجب پراکنده شدن آن می‌شوند. هر چقدر هم محیط سبکتر باشد انرژی بیشتری از نوترون به آن منتقل می‌شود. به همین دلیل جهت حفاظ‌گذاری در برابر نوترون‌های سریع از عناصر سبک مانند آب و پارافین استفاده می‌شود.

3- پراکندگی ناکشسان: در اثر برخورد نوترون پراانرژی به ماده‌ی کندکننده، بخشی از انرژی جنبشی به وسیله برانگیخته شدن هسته‌های کندکننده به آن منتقل می‌شود. این برخورد بیشتر با هسته‌های سنگین اهمیت دارد. در هسته‌های سبک فاصله‌ی ترازهای برانگیخته از حالت پایه زیاد بوده و امکان برانگیخته شدن آن‌ها حتی با نوترون‌های پراانرژی وجود ندارد ولی در هسته‌های سنگین فاصله‌ی ترازهای برانگیخته از حالت پایه کم بوده (در حد eV) و با برخورد نوترون‌های با انرژی کافی، پراکندگی ناکشسان صورت می‌گیرد (Lamarsh & Barata, 2001).

در پراکندگی ناکشسان، بخشی از انرژی جنبشی نوترون به صورت انرژی برانگیختگی به هسته (معمولاً با عدد اتمی بالا) داده می‌شود و نوترون با انرژی کمتری پراکنده می‌شود. پس از برخورد، هسته‌ی برانگیخته با گسیل پرتوی گاما، پروتون یا ذره‌ی آلفا وا می‌باشد. این نوع برخورد بیشتر با اتم‌های سنگین اهمیت دارد. این برهمکنش را می‌توان با استفاده از مدل هسته‌ی مرکب توصیف کرد. در این مدل، هسته‌ی هدف ابتدا نوترون را گیراندازی کرده و سپس آن را همراه با فوتون گاما مجدداً گسیل می‌کند. این پدیده یک واکنش آستانه‌ای است. به طور کلی سطح مقطع پراکندگی

ناکثسان کوچک است. مقدار آن برای نوترون‌های سریع از مرتبه یک بارن یا کمتر است، ولی با افزایش انرژی نوترون افزایش می‌یابد.

اگر انرژی نوترون بسیار زیاد باشد، برهمکنش پراکندگی ناکثسان با هسته‌های جاذب می‌تواند اتفاق افتد که در آن هسته‌ی پس‌زده شده طی برخورد به یکی از حالت‌های برانگیخته‌ی خود می‌رود. نوترون در این برهمکنش انرژی بیشتری را نسبت به پراکندگی کشسان معادل، از دست خواهد داد. پراکندگی ناکثسان و پرتوهای گامای متعاقب آن نقش مهمی را در حفاظسازی در برابر نوترون‌های سریع ایفا می‌کنند.

در پراکندگی‌های چندگانه نوترون، تعداد برخوردهای لازم برای این که متوسط انرژی نوترون از E_0 به E برسد طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (Lamarsh, 1999):

$$n = \frac{1}{\xi} \ln\left(\frac{E_0}{E}\right), \quad (4-1)$$

در رابطه‌ی (4-1)، ξ متوسط لگاریتم کاهش انرژی در هر برخورد است که فقط وابسته به جرم اتمی هسته (A) است و طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln\left(\frac{A-1}{A+1}\right). \quad (5-1)$$

مقدار ξ و تعداد برخوردهای لازم برای کاهش انرژی نوترون از 2 MeV به 1 eV برای تعدادی از عناصر در جدول 1-1 نشان داده شده است.

جدول 1-1: پارامترهای کندسازی نوترون برای مواد مختلف (Lamarsh, 1999).

n	ξ	$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$	A	هسته
14/5	1	0	1	هیدروژن
15/8	0/920	0/638	8/968	آب
20/0	0/725	0/111	2	دوتریوم
28/5	0/509	0/624	8/552	آب سنگین
69/4	0/209	0/640	9	برلیوم
91/3	0/158	0/716	12	کربن
121	0/120	0/779	16	اکسیژن
175/8	0/0825	0/840	23	سدیم
407	0/0357	0/931	56	آهن
1730	0/00838	0/983	238	اورانیوم

Title of Thesis: **Experimental and theoretical investigation of reflection properties of Graphite, Water, Polyethylene and Lead for thermal neutrons**

Supervisors: **Farhad Zolfagharpour (Ph. D) & Farhood Ziaie (Ph. D)**

Advisor: **Maghsoud Saadati (Ph. D)**

Graduate Degree: **Ph. D**

Major: **Physics**

Specialty: **Nuclear**

University: **Mohaghegh Ardabili**

Faculty: **Science**

Graduation date: **2018/6/3**

Number of pages: **102**

Abstract:

The neutron transportation calculations have essential importance in nuclear technologies. One of the important elements of reactors and neutron therapy systems is reflector. A suitable reflector reduces the leakage of neutrons. Because of the reflection, neutron flux increases in the core. Therefore, a reflector indirectly helps to decrease the critical mass of the reactor core. It is essential to determine material type and optimal thickness of reflector for neutron systems. In this thesis, at first the thermal neutrons albedo coefficients of mono-material and bi-material reflectors have been obtained using the neutron diffusion equation for different thicknesses of water, polyethylene, lead and graphite reflectors and their combinations. Then, the position of detector, source, moderator and reflector have been simulated using MCNPX code. Neutron flux value, spectral shift and thermal neutrons reflection parameters have been obtained by considering different thickness of used reflectors using MCNPX code and suitable experimental geometry has been designed based on simulation results via MCNPX code. The measured equipment consist of a ^{241}Am -Be neutron source (5.2 Ci), BF_3 detector, cadmium as neutron absorber, water as neutron moderator, lead as shield, iron holder and different thicknesses of water, polyethylene, graphite and lead reflectors. Reflected thermal neutrons from the different thicknesses of mono-material and bi-material reflectors have been measured using BF_3 detector. Then, albedo coefficient, reflection parameter and reflection cross section of thermal neutrons have been calculated for each of them. Finally, the results of these three steps have been compared with each other and by regarding thermal neutrons reflection coefficient and neutron spectral shift, the appropriate reflector and its optimum thickness have been assigned. The obtained results show that the maximum value of albedo coefficient is for polyethylene with 8 cm thickness. Also, the thermal neutrons reflection increases for bi-material reflectors when the thermal neutrons reflection coefficient of second material is higher than the first material which cause to improve the reflector efficiency.

Keywords: **Neutron detection, Neutron reflector, Neutron transport, Albedo coefficient, Thermal neutrons**



Faculty of Science
Department of Physics

**Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the
degree of Ph. D in Nuclear Physics**

Title:

**Experimental and Theoretical Investigation of Reflection Properties of
Graphite, Water, Polyethylene and Lead for Thermal Neutrons**

Supervisors:

Farhad Zolfagharpour (Ph. D)

Farhood Ziaie (Ph. D)

Advisor:

Maghsoud Saadati (Ph. D)

By:

Sara Azimkhani

June – 2018