بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه پیام نور

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته‌ای

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

عنوان پایان نامه :

مطالعه پتانسیل کل در برهمکنش یون‌های سنگین با استفاده از داده‌های توزیع سد همجوشی

استاد راهنما :

آقای دکتر امید ناصرقدسی

استاد مشاور :

آقای دکتر جمیل آریایی

نگارش :

صدیقه حسامی رستمی

بهمن ۱۳۸۸

جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه پیام نور

تاریخ: ۱۳۸۸/۱۱/۰۴
شماره: ۰۸۱۰۶۰۰۶۵
پیوست: .....

بسمه تعالی

تصویب نامه پایان نامه

پایان نامه تحت عنوان : **مطالعه پتانسیل کل در برهمکنش یون های سنگین با استفاده از داده های توزیع سد همجوشی** که توسط **صدیقه حسامی رستمی** تهیه و به هیأت داوران ارائه گردیده است مورد تایید می باشد.

تاریخ دفاع : ۸۸/۱۱/۱۴ نمره : ۱۹/۷۵ درجه ارزشیابی : عالی

اعضای هیأت داوران :

نام و نام خانوادگی:	هیأت داوران	مرتبه علمی	امضاء
دکتر امید ناصرقدسی	استاد راهنما	استادیار	
	استاد راهنمای همکار		
دکتر جمیل آریایی	استاد مشاور	استادیار	
دکتر محمدفرهاد رحیمی	استاد داور	استاد	
دکتر سعید محمدی	نماینده گروه آموزشی	دانشیار	

تقدیم به آستان ملکوتی، هشتمین ستاره آسمان ولایت حضرت علی ابن موسی الرضا (ع)

تقدیم به روح بلند مادرم که مهربانیش بی دریغ بود و دلتنگی ام برایش بی پایان

تقدیم به پدر بزرگوارم که سایه وجودش زندگی بخش است و بی مانند

تقدیم به خانواده عزیزم که هر آنچه دارم از محبت و حمایت آنهاست

تقدیم به اساتید ارجمندم آقای دکتر ناصر قدسی و آقای دکتر آریایی به پاس تمام زحمات آنها .

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس فراوان ایزد منّان که توفیق آموختن علم را در مرحله ای دیگر از تحصیل نصیبم کرد.

بر خود لازم می دانم از استاد راهنمای محترم، آقای دکتر امید ناصر قدسی که در طول انجام این پایان نامه بار، نمودهایشان همواره کننده راه و مشوقم بوده اند صمیمانه تشکر و قدردانی کنم.

از استاد مشاور ارجمندم آقای دکتر جمیل آریایی که افتخار شاگردی ایشان را داشتم و مشوق اینجانب بوده اند صمیمانه تشکر می کنم.

از استاد بزرگوار آقای دکتر محمد فرهاد رحیمی که زحمت مطالعه این پایان نامه و حضور در جلسه دفاع و مسئولیت داوری را پذیرفتند کمال تشکر را دارم.

از نماینده گروه آموزشی، آقای دکتر سعید محمدی که در جلسه دفاع اینجانب حضور داشتند کمال تشکر را دارم.

از خانواده خود و تمامی دوستان و عزیزانی که در انجام این پایان نامه کمک نمودند، صمیمانه قدردانی می کنم.

چکیده:

در این تحقیق با مدل دابل فولدینگ پتانسیل کل واکنش‌های $^{17}O+^{144}Sm$ ،$^{16}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ را حساب کرده‌ایم و آنگاه این پتانسیل را در محاسبات سطح مقطع همجوشی واکنش-های فوق با مدل SBPM و توزیع سد همجوشی به کار برده‌ایم. نتایج مدل دابل فولدینگ نشان می‌دهند که در انرژی‌های بالای سد همجوشی محاسبات نظری با داده‌های تجربی وفق نمی‌دهند و پتانسیل نیز در ناحیه برهمکنش هسته‌ها بشدت جاذب است که به نظر می‌رسد علت آن ناشی از تقریب سریع باشد که در این مدل به کار می‌رود و سبب می‌شود که اثرهای تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای در محاسبه پتانسیل کل به حساب آورده نشود. برای بررسی بیشتر، پتانسیل کل این واکنش-ها را با روش پراکسی‌میتی نیز حساب کرده‌ایم. چون در این روش اثر کشش سطحی در محاسبه پتانسیل هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود مقادیر پتانسیل کل در ناحیه برهمکنش هسته‌ها برخلاف مدل دابل فولدینگ مثبت شده و دره‌ای کم عمق در شکل پتانسیل پیدا می‌شود که شبیه اثرهای اصلاحی معادله حالت هسته‌ای در محاسبه پتانسیل کل است. در واکنش‌های $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{144}Sm$ با استفاده از روش پراکسی‌میتی نتایج بهتری حاصل شده است اما در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$ این توافق چندان خوب نیست که شاید ناشی از اثرات تغییر شکل هسته باشد و این مساله تحقیقات فراتری را می‌طلبد.

واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ را نیز مطالعه کرده‌ایم. در این واکنش‌ها پرتابه‌ها، هسته‌هایی پر نوترون هستند و ^{11}Be هسته‌ای هاله‌ای است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با روش پراکسی-میتی و با در نظر گرفتن کانال‌های جفت‌شدگی می‌توان این نوع واکنش‌ها را توضیح داد. افزایش پارامتر پخشیدگی سطحی نوکلئون‌ها از مقدار۰/۶۳ fm (که از تحلیل داده‌های پراکندگی بدست آمده است) به مقدار ۰/۷۳ fm در محاسبات ، می‌تواند ناشی از باز شدن کانال‌های همجوشی ناقص در این نوع واکنش‌ها باشد.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول : مقدمه‌ای بر پتانسیل کل واکنش همجوشی یون‌های سنگین

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ فرمالیزم چگالی انرژی در سطح مقطع همجوشی ۳

۱-۳ مدل محاسبات کانال‌های جفت شده ٤

۱-۳-۱ معادلات کانال‌های جفت شده ٥

۱-۳-۲ عناصر ماتریس جفت‌شدگی ۷

۱-۳-۲-۱ جفت‌شدگی چرخشی ۷

۱-۳-۲-۲ جفت‌شدگی ارتعاشی ۸

۱-٤ مدل MBPM در محاسبه سطح مقطع همجوشی ۹

فصل دوم : مدل DF و پتانسیل Proximity

۲-۱ مقدمه ١٤

۲-۲ مدل DF ١٤

۲-۲-۱ خواص برهمکنش ١٦

۲-۲-۲ برهمکنش M3Y ۱۷

۲-۳ پتانسیل Proximity ۱۸

۲-۳-۱ پتانسیل .Prox در هسته‌ها ..... ۱۸.

فصل سوم : روابط محاسبه سطح مقطع همجوشی و توزیع سد همجوشی

۳-۱ مقدمه ۲۲

۳-۲ محاسبه سطح مقطع همجوشی یون‌های سنگین در مدل SBPM ۲۳

۳-۲-۱ تاثیر تغییرات محل سد همجوشی در محاسبه سطح مقطع همجوشی ۲٦

۳-۲-۲ روابط دیگر در سطح مقطع همجوشی ۲۷

۳-۳ توزیع سد همجوشی ۳۳

فصل چهارم : محاسبات و نتایج

٤-۱ مقدمه ۳۷

٤-٢ مطالعه و بررسی واکنش‌های $^{16}O+^{144}Sm$، $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ ٣٧
٤-٢-١ محاسبات با استفاده از پتانسیل هسته‌ای وودز- ساکسون در پتانسیل کل همجوشی هسته‌ای ٣٧
٤-٢-٢ محاسبات با استفاده از پتانسیل DF..... ٤٠
٤-٢-٣ محاسبات با استفاده از روش .Prox ٤٧
٤-٢-٤ تفاوت نتایج پتانسیل DF و پتانسیل .Prox ٥٦
٤-٢-٥ نتایج مطالعه و بررسی واکنش‌های $^{16}O+^{144}Sm$، $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ ٥٩
٤-٣ مطالعه و بررسی واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ ٦١
٤-٣-١ محاسبات با استفاده از روش .Prox..... ٦٢
٤-٣-٢ محاسبه سطح مقطع همجوشی با استفاده از محاسبات کانال‌های جفت شده..... ٦٣
٤-٣-٣ نتایج مطالعه و بررسی واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ ٦٤
فهرست منابع..... ٧١
پیوست الف..... ٧٤
چکیده انگلیسی (Abstract)

جدول (٤-١) مقادیر پارامترهای پتانسیل WS ، محل سد و ارتفاع سد پتانسیل بدست آمده از پتانسیل WS و ارتفاع سد پتانسیل تجربی در واکنش‌های $^{16}O+^{144}Sm$ ، $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ ٣٩
جدول (٤-٢) محل سد و ارتفاع سد پتانسیل بدست آمده از پتانسیل DF در واکنش‌های $^{16}O+^{144}Sm$ ، $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ ٤١
جدول (٤-٣) محل سد و ارتفاع سد در واکنش‌های $^{16}O+^{144}Sm$ ، $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ بدست آمده از پتانسیل .Prox با انتخاب ΔR ٤٨
جدول (٤-٤) نتایج حاصل از محاسبات با پتانسیل .Prox با انتخاب ΔR در واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ به همراه محل و ارتفاع سد کولنی ٦٣
جدول (٤-٥) مقادیر برانگیزش پرتابه در محاسبات کد CCFULL در واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ ٦٤
جدول (٤-٦) مقادیر پارامترهای پتانسیل WS ، فیت شده بر روی پتانسیل .Prox در واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ و مقادیرخطای نسبی ٦٤
شکل (١-١) نمایشی از مختصات یک هسته تغییر شکل یافته ١٠
شکل (٢-١) نمایشی از مختصات موضعی برهمکنش دو هسته کروی در مدل DF ١٥
شکل (٢-٢) تابع پتانسیل .Prox بدون بعد $\Phi(z)$ بر حسب فاصله جدایی بدون بعد z ٢٠
شکل (٣-١) شکل شماتیک پتانسیل کل به همراه تقریب سهموی سد پتانسیل ٢٩
شکل (٣-٢) محاسبه $T_1(E)$ در انرژی‌های زیر سد همجوشی مانند انرژی E_1 با استفاده از تقریب WKB و در انرژی‌های بالای سد همجوشی مانند E_2 با استفاده از رابطه هیل _ ویلر ٢٩
شکل (٣-٣)تغییرات ضریب نفوذ $T_0(E)$ برحسب انرژی با تقریب WKB و رابطه هیل _ویلر ٣٠
شکل (٣-٤) تغییرات T_1 بر حسب اندازه حرکت زاویه‌ای l با تقریب WKB و رابطه هیل _ ویلر ٣٠
شکل (٣-٥) شکل شماتیک تقریب محل سدها با محل سد کولنی و ارتفاع سدهای بدست آمده از رابطه (٣-١٩) ٣١
شکل (٣-٦) اصلاح تقریب ها و تغییرات محل و ارتفاع سد به ازای lهای مختلف ٣١

شکل (۳-۷) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی بدست آمده از تقریب بیان شده در شکل(۳-۵) و با اصلاح تقریب ها..... ۳۲
شکل (۳-۸) نمودارخطی سطح مقطع همجوشی بدست آمده از تقریب بیان شده در شکل(۳-۵) و با اصلاح تقریب ها..... ۳۲
شکل (٤-۱) پتانسیل کل در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$ حاصل از پتانسیلWS و پتانسیلDF به همراه ارتفاع سد تجربی . پتانسیلWS با خط پر و پتانسیل DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤١
شکل (٤-۲) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$ به همراه داده های تجربی. سطح مقطع همجوشیWS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٢
شکل(٤-۳) نمودارخطی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشیWS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٢
شکل (٤-٤) نمودار توزیع سد همجوشی در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشیWS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٣
شکل (٤-٥) پتانسیل کل در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$ حاصل از پتانسیلWS و پتانسیلDF به همراه ارتفاع سد تجربی . پتانسیلWS با خط پر و پتانسیلDF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٣
شکل (٤-٦) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشیWS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٤
شکل (٤-۷) نمودارخطی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشیWS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٤
شکل (٤-۸) نمودار توزیع سد همجوشی در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشیWS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٥
شکل (٤-۹) پتانسیل کل در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$ حاصل از پتانسیلWS و پتانسیلDF به همراه ارتفاع سد تجربی . پتانسیلWS با خط پر و پتانسیل DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٥

شکل (٤-١٠) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشی WS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٦
شکل (٤-١١) نمودارخطی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشی WS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٦
شکل (٤-١٢) نمودار توزیع سد همجوشی در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$ به همراه داده‌های تجربی. سطح مقطع همجوشی WS با خط پر و سطح مقطع همجوشی DF با خط تیره نشان داده شده است..... ٤٧
شکل (٤-١٣) سد پتانسیل بدست آمده از روش .Prox به ازای ΔR های مختلف ٤٩
شکل (٤-١٤) سطح مقطع های همجوشی حاصل از پتانسیل.Prox به ازای ΔR های مختلف ٤٩
شکل (٤-١٥) پتانسیل کل در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$، پتانسیل WS با خط پر، پتانسیل DF با خط تیره و پتانسیل .Prox با خط تیره- نقطه به همراه ارتفاع سد تجربی نشان داده شده است..... ٥٠
شکل (٤-١٦) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$. سطح مقطع WS با خط پر، سطح مقطع DF با خط تیره و سطح مقطع .Prox با خط تیره- نقطه به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است ٥٠
شکل (٤-١٧) نمودار خطی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$. سطح مقطع WS با خط پر، سطح مقطع DF با خط تیره و سطح مقطع .Prox با خط تیره- نقطه به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است ٥١
شکل (٤-١٨) نمودار خطی توزیع سد همجوشی در واکنش $^{16}O+^{144}Sm$. توزیع سد WS با خط پر، توزیع سد DF با خط تیره و توزیع سد .Prox با نقطه چین به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است..... ٥١
شکل (٤-١٩) پتانسیل کل در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$، پتانسیل WS با خط پر، پتانسیل DF با خط تیره و پتانسیل .Prox با خط تیره- نقطه به همراه ارتفاع سد تجربی نشان داده شده است..... ٥٢
شکل (٤-٢٠) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$. سطح مقطع WS با خط پر، سطح مقطع DF با خط تیره و سطح مقطع .Prox با خط تیره- نقطه به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است ٥٢

شکل (٤-٢١) نمودار خطی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$. سطح مقطع WS با خط پر، سطح مقطع DF با خط تیره و سطح مقطع .Prox با خط تیره- نقطه به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است..... ٥٣
شکل (٤-٢٢) نمودار خطی توزیع سد همجوشی در واکنش $^{17}O+^{144}Sm$. توزیع سد WS با خط پر، توزیع سد .D.F با خط تیره و توزیع سد .Prox با نقطه چین به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است..... ٥٣
شکل (٤-٢٣) پتانسیل کل در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$، پتانسیل WS با خط پر، پتانسیل DF با خط تیره و پتانسیل .Prox با خط تیره- نقطه به همراه ارتفاع سد تجربی نشان داده شده است..... ٥٤
شکل (٤-٢٤) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$. سطح مقطع WS با خط پر، سطح مقطع DF با خط تیره و سطح مقطع .Prox با خط تیره- نقطه به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است..... ٥٤
شکل (٤-٢٥)نمودار خطی سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$. سطح مقطع WS با خط پر، سطح مقطع DF با خط تیره و سطح مقطع .Prox با خط تیره-نقطه به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است..... ٥٥
شکل (٤-٢٦) نمودار خطی توزیع سد همجوشی در واکنش $^{16}O+^{154}Sm$. توزیع سد WS با خط پر، توزیع سد DF با خط تیره و توزیع سد .Prox با نقطه چین به همراه داده‌های تجربی نشان داده شده است..... ٥٥
شکل (٤-٢٧) بررسی ضریب نفوذ از سد همجوشی در پتانسیل .Prox و پتانسیل DF در انرژی‌های متفاوت..... ٥٧
شکل (٤-٢٨) ضریب نفوذ از سد همجوشی در دو پتانسیل .Prox و پتانسیل DF..... ٥٨
شکل (٤-٢٩) نتایج ضریب نفوذ از سد همجوشی در دو پتانسیل .Prox و پتانسیل DF..... ٥٨
شکل (٤-٣٠) پتانسیل کل در واکنش $^{11}Be+^{209}Bi$،پتانسیل .Prox با خط پر و پتانسیل به کار رفته در [٤٤] با خط تیره نشان داده شده است..... ٦٦
شکل (٤-٣١) پتانسیل کل در واکنش $^{10}Be+^{209}Bi$،پتانسیل .Prox با خط پر و پتانسیل به کار رفته در [٤٤] با خط تیره نشان داده شده است..... ٦٦
شکل (٤-٣٢) پتانسیل کل در واکنش $^{9}Be+^{209}Bi$،پتانسیل .Prox با خط پر و پتانسیل به کار رفته در [٤٤] با خط تیره نشان داده شده است..... ٦٧

شکل (٤-٣٣) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{11}Be + ^{209}Bi$. سطح مقطع .Prox با خط پر، سطح مقطع پتانسیل .Prox با محاسبه CC با خط تیره، همراه نقاط تجربی نشان داده شده است ٦٨
شکل (٤-٣٤) نمودار خطی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{11}Be + ^{209}Bi$. سطح مقطع .Prox با خط پر، سطح مقطع پتانسیل.Prox با محاسبه CC با خط تیره، همراه نقاط تجربی نشان داده شده است ٦٨
شکل (٤-٣٥) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{10}Be + ^{209}Bi$. سطح مقطع .Prox با خط پر، سطح مقطع پتانسیل.Prox با محاسبه CC با خط تیره، همراه نقاط تجربی نشان داده شده است ٦٩
شکل (٤-٣٦) نمودار خطی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{10}Be + ^{209}Bi$. سطح مقطع .Prox با خط پر، سطح مقطع پتانسیل.Prox با محاسبه CC با خط تیره، همراه نقاط تجربی نشان داده شده است ٦٩
شکل (٤-٣٧) نمودار لگاریتمی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{9}Be + ^{209}Bi$. سطح مقطع .Prox با خط پر، سطح مقطع پتانسیل.Prox با محاسبه CC با خط تیره، همراه نقاط تجربی نشان داده شده است ٧٠
شکل (٤-٣٨) نمودار خطی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{9}Be + ^{209}Bi$. سطح مقطع .Prox با خط پر، سطح مقطع پتانسیل.Prox با محاسبه CC با خط تیره، همراه نقاط تجربی نشان داده شده است ٧٠

Abstract

The total potential of the fusion reactions $^{16}O+^{144}Sm$, $^{17}O+^{144}Sm$, and $^{16}O+^{154}Sm$ has been calculated using the Double Folding model and then this potential in turn has been employed in the SBPM model calculation of the fusion cross sections of the above reactions and finding the distribution of the fusion barrier. The results of the Double Folding model show that at energies higher than the height of the fusion barrier the theoretical results do not agree with experimental data and the potential is strongly negative in the region of the interaction of the nuclei. This seems to be due to the sudden approximation used in this model which causes the effects of the nuclear matter incompressibility not to be taken into account in the calculation of the total potential. As a further check, we have also used the proximity method to calculate the total potential of these fusion reactions. Since in this model the surface tension is taken into account in the calculation of the nuclear potential, in contrast to the Double Folding model the results become positive and there appears a shallow valley in the shape of the potential that resembles the correction effects of the nuclear state equation in the calculation of the total potential. Better results are obtained using the proximity method in the fusion reactions of $^{16}O+^{144}Sm$ and $^{17}O+^{144}Sm$. However this is not the case with the fusion reaction of $^{16}O+^{154}Sm$. The poor results in the latter fusion reaction could be due the effects of the deformation of the nuclei. This claim needs to be investigated separately.

The fusion reactions $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ have also been studied. The projectiles in these reactions are neutron-rich nucleus and ^{11}Be is halo nucleus. The results of the proximity method reveals that considering the coupling channels one could explain such light-heavy reactions successfully. Increasing the value of the surface diffusion parameter of the nucleon from 0.63 fm (obtained from analyzing the scattering data) to 0.73 fm in our calculations could be due to the opening of the incomplete fusion channels in such reactions.

فصل اول

مقدمه‌ای بر پتانسیل کل واکنش همجوشی یون‌های سنگین

۱-۱ مقدمه

مطالعه بر روی تولید هسته‌های فوق سنگین از طریق واکنش یون‌های سنگین یکی از مباحث مورد توجه محققین فیزیک هسته‌ای در سال‌های اخیر بوده و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای برای یافتن هسته‌های فوق سنگین صورت گرفته که موفقیت‌هایی را نیز در پی داشته است.

در مطالعه واکنش یون‌های سنگین مهمترین بخش، محاسبه پتانسیل بین هسته‌های شرکت کننده در برهمکنش می‌باشد. زیرا محاسبه این کمیت فیزیکی هم به منظور توضیح سطح مقطع واکنش و هم در توضیح پدیده‌هایی که در برخورد بین دو هسته اتفاق می‌افتد اهمیت بسزایی دارد. یکی از روش‌های تولید هسته‌های فوق سنگین که در دو دهه اخیر هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت تئوری بسیار مورد توجه قرار گرفته است، همجوشی یون‌های سنگین در انرژی‌های نزدیک به سد کولنی است. پیشرفت قابل توجه تکنیک‌های تجربی که در سال‌های اخیر بدست آمده زمینه‌ای را فراهم می‌کند که با انجام اندازه گیری‌های دقیق قادر به مطالعه جزئیات همجوشی نزدیک سد و اثرات دقیق همراه آن باشیم . مطالعات تجربی نشان می‌دهد جفت شدگی درجات آزادی ذاتی هسته-ای و حرکت نسبی بر روی سطح مقطع همجوشی در انرژی‌های زیر سدی اثر دارد و همچنین توزیع سد همجوشی به ساختار هسته‌های شرکت کننده حساس است [۱].

برای بدست آوردن پتانسیل برهمکنش تاکنون روش‌های متفاوتی پیشنهاد شده است که در هر کدام از آن‌ها تقریب‌های خاصی به کار رفته است که می‌توان مدل دابل فولدینگ[۱] ، فرمالیزم انرژی چگالی[۲] و روش پراکسی‌میتی[۳] را نام برد [۲،۳،٤].

مدل DF مربوط به سیستم دو هسته‌ای می‌باشد که با ارائه روشی مبنی بر مجموع تاثیر توزیع بار هسته‌ای هدف و پرتابه بر روی هم پتانسیلی را تحت عنوان پتانسیل فولدینگ ارائه می‌کند. در دهه‌های اخیر عده‌ای از محققین سعی کرده‌اند، با استفاده از مدلDF پتانسیل را مستقل از داده‌های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی و با استفاده از برهمکنش نوکلئون_ نوکلئون از نوع M3Y[٤] و چگالی ماده هسته‌ای محاسبه کنند. روش .Prox در محاسبه پتانسیل یون‌های سنگین ارائه شده است که می‌توان با استفاده از این روش پتانسیل هسته‌ای بین هسته‌های شرکت کننده در برهمکنش را

---

۱ Double Folding
۲ Energy Density Formalism
۳ Proximity
٤ Michigan 3 Yukawa

بدست آورد. در این روش اثرات ناشی از کشش سطحی در محاسبه پتانسیل برهمکنش در نظر گرفته شده است.

همچنین در محاسبه سطح مقطع همجوشی یون‌های سنگین نیز چندین مدل ارائه شده است که عبارتند از مدل تونل زنی کوانتومی از سد یک بعدی[۱] و مدل تونل زنی کوانتومی از سد چندگانه[۲] و محاسبات کانال‌های جفت شده[۳].

در ادامه این فصل به معرفی فرمالیزم انرژی چگالی و محاسبات کانال‌های جفت شده و و مدل تونل زنی کوانتومی از سد چندگانه پرداخته می‌شود. در فصل دوم مدل DF و پتانسیل .Prox معرفی می‌شود. در فصل سوم محاسبه سطح مقطع همجوشی با استفاده از مدل تونل زنی کوانتومی از سد یک بعدی SBPM و محاسبه توزیع سد همجوشی بیان می‌شود. در فصل چهارم محاسبات و نتایج بر روی واکنش‌های $^{16}O+^{144}Sm$، $^{17}O+^{144}Sm$ و $^{16}O+^{154}Sm$ و واکنش‌های $^{11,10,9}Be+^{209}Bi$ ارائه شده است.

۱-۲ فرمالیزم انرژی چگالی در سطح مقطع همجوشی

در واکنش همجوشی یون‌های سنگین درون ناحیه سد کولنی ، که هسته‌های پرتابه و هدف با یکدیگر همپوشانی دارند، اثر اشباع نقش مهمی را ایفا می کند. مدلی برای پتانسیل بین هسته‌ای که خصوصیات اشباع ماده هسته‌ای را در محاسبات به طور سازگاری در نظر بگیرد ، وجود دارد که آن فرمالیزم انرژی چگالی (EDF) است که اولین بار توسط Brucher و همکارانش پیشنهاد شد[٤]. این مدل پتانسیل را از تابعی انرژی برای سیستم دو هسته‌ای بدست می‌آورد [٥،٦].

Brink و Stauca به طور گسترده قابلیت اجرای این روش را با استفاده از تابعی انرژی Skyrme بررسی کرده اند[۹،۸،۷] . آنها همچنین نشان داده‌اند که پتانسیلEDF با پتانسیل .Prox سازگار است. همچنین می‌توان از آن برای مطالعه واکنش همجوشی در انرژی‌های زیر سد کولنی همراه با در نظر گرفتن اصلاحات ناشی از در نظر گرفتن کانال‌های جفت شده استفاده کرد. در فرمالیزم انرژی چگالی ، پتانسیل بین هسته‌ای با استفاده از تقریب چگالی منجمد[٤] که در این تقریب فرض می‌شود چگالی هسته‌های پرتابه و هدف در طی واکنش تغییر نکنند ، توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [٥] :

---

۱ Single Barrier Penteration Model
۲ Multi Barrier Penteration Model
۳ Coupled channels Calculation(CC)
٤ Frozen density

$$V(R)=\int\{e\left[r_p^{(P)}(\vec{r})+r_p^{(T)}(\vec{r},\vec{R}),\, r_n^{(P)}(\vec{r})+r_n^{(T)}(\vec{r},\vec{R})\right] - e\left[r_p^{(P)}(\vec{r}),\, r_n^{(P)}(\vec{r})\right]-e\left[r_p^{(T)}(\vec{r},\vec{R}),\, r_n^{(T)}(\vec{r},\vec{R})\right]\}\,d\vec{r} \qquad (۱-۱)$$

در رابطه فوق $e[r_p(\vec{r}),r_n(\vec{r})]$ تابع انرژی چگالی و $r_p^{(P,T)}(\vec{r})$ و $r_n^{(P,T)}(\vec{r})$ به ترتیب توزیع چگالی پروتون و نوترون هسته‌های پرتابه و هدف می‌باشند. $r(\vec{r},\vec{R})$ چگالی را نمایش می‌دهد که مرکزش در $\vec{R}$ است. جمله اول در رابطه بالا انرژی کل سیستم را ، وقتی دو یون در فاصله جدایی $\vec{R}$ هستند، بیان می‌کند . در این روش از تابعی Skyrme در $e[r_p(\vec{r}),r_n(\vec{r})]$ استفاده می‌شود که شکل صریح آن در[۷،۱۰،۱۱] بیان شده است.

تقریب چگالی منجمد اشاره می‌کند که واکنش سریعاً اتفاق می‌افتد. حد مقابل این تقریب ، تقریب بی‌دررو است که چگالی یون‌های برخورد کننده در هر لحظه به طور دینامیکی تغییر می‌کند. EDF می‌تواند با هر دو تقریب وفق داده شود.

همچنین در مطالعه واکنش‌های همجوشی برای تولید هسته‌های فوق سنگین از تقریب تابعی انرژی ـچگالی Skyrme استفاده می‌شود که مطالعه برروی ۷٦ واکنش همجوشی با $Z_1Z_2<1200$ توسط Wang و همکارانش ارائه شده است[۱۲] .

۱-۳ محاسبات کانال‌های جفت شده

در این بخش اثرات کانال‌های جفت شده را با در نظر گرفتن همه مرتبه‌های جفت شدگی در واکنش‌های همجوشی یون‌های سنگین مطالعه می‌کنیم. این اثرات نقش مهمی در واکنش‌های همجوشی یون‌های سنگین در انرژی‌های زیر سدی ایفا می‌کنند.

مطالعات تجربی و تئوری واکنش‌های همجوشی در انرژی‌های نزدیک و زیر سد کولنی، اثرات قوی جفت شدگی حرکت نسبی هسته‌های برهمکنش‌کننده با حرکت ذاتی هسته‌ای را معلوم کرده‌اند. وقتی انرژی فرودی زیاد نیست فرآیند واکنش از طریق تونل زنی کوانتومی از سد کولنی صورت می‌گیرد . با پیشرفت تکنیک‌های آزمایشگاهی اخیراً سطح مقطع همجوشی با دقت بالا در فاصله‌های انرژی کم اندازه گیری می‌شود. داده‌های تجربی با دقت بالا توجه خاصی را در سال‌های اخیر در مطالعه همجوشی زیر سدی یون سنگین به وجود آورده است .

در گذشته محاسبات کانال‌های جفت شده اغلب با استفاده از تقریب جفت شدگی خطی انجام می‌شد که در پتانسیل جفت شدگی، که برحسب پارامتر تغییر شکل بسط داده می‌شود، فقط جمله خطی را در نظر می‌گیرند . مطالعات نشان می‌دهد که جفت شدگی غیر خطی به طور قابل توجهی

روی شکل توزیع سد همجوشی اثر می‌گذارد. بنابراین تقریب جفت شدگی خطی برای مقایسه با داده‌های با دقت بالا مناسب نمی‌باشد.

برنامه CCFULL شامل جفت شدگی برای همه مرتبه‌ها می‌باشد[۱۳] . ابعاد معادلات کانال‌های جفت شده بسیار بزرگ است و برای کاهش ابعاد معادلات از تقریب غیرکوریولیس که گاهی اوقات تقریب هم مرکزگریز می‌گویند، استفاده می‌شود.

۱-۳-۱ معادلات کانال‌های جفت شده

در واکنش‌های همجوشی یون سنگین یک تقریب مناسب این است که اندازه حرکت زاویه‌ای حرکت نسبی l را با اندازه حرکت زاویه‌ای کل J جایگزین کنیم که این همان تقریب غیرکوریولیس یا هم مرکز گریز می‌باشد. معادله کانال‌های جفت شده به صورت زیر است[۱۳] :

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dr^2}+\frac{J(J+1)\hbar^2}{2m\,r^2}+V_N^{(0)}(r)+\frac{Z_P Z_T e^2}{r}+e_n-E\right]y_n(r)+\sum_m V_{nm}(r)\,y_m(r)=0 \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه r مولفه شعاعی مختصه حرکت نسبی و m جرم کاهش یافته سیستم و E انرژی بمباران در سیستم مرکز جرم و e_n انرژی برانگیزش در کانال nام است.

V_{nm} عناصر ماتریس جفت شدگی هستند که در مدل جمعی شامل مؤلفه‌های کولنی و هسته‌ای می‌باشد. $V_N^{(0)}$ پتانسیل هسته ای وودز_ ساکسون[۱] می‌باشد.

$$V_N^{(0)}(r)=-\frac{V_0}{1+\exp\left(\frac{r-R_0}{a}\right)} \qquad R_0=r_0\left(A_P^{\frac{1}{3}}+A_T^{\frac{1}{3}}\right) \qquad (۳-۱)$$

معادلات کانال‌های جفت شده با اعمال شرایط مرزی حل می‌شود. امواج ورودی در $r=r_{min}$ و امواج خروجی در بی‌نهایت برای همه کانال‌ها به جز کانال ورودی $(n=0)$ وجود دارد [۱۳] .

$$y_n(r)\ \rightarrow\ T_n\exp\left(-i\int_{r_{min}}^{r}k_n(r')dr'\right) \qquad r\le r_{min} \qquad (٤-۱)$$

$$\rightarrow\ H_J^{(-)}(k_n r)d_{n,0}+R_n H_J^{(+)}(kr) \qquad r>r_{max} \qquad (۵-۱)$$

که در آن :

$$k_n(r)=\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}\left(E-e_n-\frac{J(J+1)\hbar^2}{2m\,r^2}-V_N(r)-\frac{Z_P Z_T e^2}{r}-V_{nn}(r)\right)} \qquad (٦-۱)$$

---

[۱] Woods-Saxon

که k_n عدد موج موضعی در کانال nام و $k_n = k_n(r=\infty)$ است. $H_J^{(+)}$ و $H_J^{(-)}$ به ترتیب توابع کولنی ورودی و خروجی هستند. برای اطمینان از اینکه امواج ورودی در $r = r_{min}$ وجود دارند از معادلات کانال‌های جفت شده داریم :

$$y_n(r_{min}) = 1\ , \qquad y_n(r_{min}) = 0 \quad (m \neq n), \tag{۷-۱}$$

$$\frac{d}{dr} y_n(r_{min}) = -i\,k_n(r_{min})\ , \qquad \frac{d}{dr} y_n(r_{min}) = 0 \quad (m \neq n)\ . \tag{۸-۱}$$

که برای مشتق اول تابع موج در y_n معادله (۱-٤) استفاده می‌شود. برای تعیین توابع موج در $r = r_{min} + h$ تا $r = r_{max}$ از روش تصحیح شده Numerov استفاده می‌شود[١٤] ، که توابع موج در $r_{i+1} = r_{min} + (i+1)h$ بصورت زیر می‌باشد :

$$\vec{y}^{(i+1)} = \left(1 - \frac{h^2}{12} A^{i+1}\right)^{-1} \left[\left\{ \left(\frac{h^2}{\sqrt{12}} A_i + \sqrt{3} \right)^2 - 1 \right\} \left(1 - \frac{h^2}{12} A^i\right) \vec{y}^{\,i} - \left(1 - \frac{h^2}{12} A^{i-1}\right) \vec{y}^{\,i-1} \right] \tag{۹-۱}$$

که $A_{nm}(r)$ بصورت زیر تعریف می‌شود :

$$A_{nm}(r) = \frac{2m}{\hbar^2} \left[\left(V^{(0)}{}_N(r) + \frac{J(J+1)\hbar^2}{2m\,r^2} + \frac{Z_P Z_T e^2}{r} + e_n - E \right) d_{n,m} - V_{nm}(r) \right] \tag{۱۰-۱}$$

که y_i تابع موج در r_i می‌باشد .

فرض می شود $c_{nm}(r)$ تابع موج کانال mام باشد و $y_m(r)$ در شرایط مرزی رابطه (۱-٤) در $r = r_{min}$ صدق کند. در $r = r_{max}$ می‌تواند جمع موج کولنی ورودی و خروجی بیان شود.

$$c_{nm}(r) = C_{nm} H_J^{(-)}(k_m r) + D_{nm} H_J^{(+)}(k_m r) \qquad r \to r_{max} \tag{۱۱-۱}$$

ضرایب C_{nm} و D_{nm} یا با مشتق لگاریتمی در $r = r_{max}$ یا با نسبت توابع موج در $r = r_{max} - h$ به $r = r_{max} + h$ تعیین می‌شوند که به صورت زیر بدست می‌آیند :

$$C_{nm} = \frac{H_{Jm}^{(+)(i-1)} c_{nm}^{(i+1)} - H_{Jm}^{(+)(i+1)} c_{nm}^{(i-1)}}{H_{Jm}^{(+)(i-1)} H_{Jm}^{(-)(i+1)} - H_{Jm}^{(+)(i+1)} H_{Jm}^{(-)(i-1)}} \tag{۱۲-۱}$$

$$D_{nm} = \frac{H_{Jm}^{(-)(i-1)} c_{nm}^{(i+1)} - H_{Jm}^{(-)(i+1)} c_{nm}^{(i-1)}}{H_{Jm}^{(-)(i-1)} H_{Jm}^{(+)(i+1)} - H_{Jm}^{(-)(i+1)} H_{Jm}^{(+)(i-1)}} \tag{۱۳-۱}$$

با تعریف $H_{Jm}^{(+)(i+1)} \equiv H_J^{(+)}(k_m.(r_{max}+h))$ و $c_{nm}^{i+1} \equiv c_{nm}(r_{max}+h)$ ماتریس‌های C و D تعیین می‌شوند. حل معادلات کانال‌های جفت شده با شرایط مرزی (۱-٤) و (۱-۵) با تقریب خطی c_{nm} به صورت زیر می‌باشد :

$$y_m(r) = \sum_n T_n\, c_{nm}(r) \tag{۱٤-۱}$$