

حاشا  
البربر  
البربر





دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

رشته فیزیک ، گرایش فیزیک هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

# بررسی پتانسیل‌های تقریبی در واکنش‌های همجوشی هسته‌ای

نگارنده: عافیه آور

اساتید راهنما

دکتر حسن حسن‌آبادی  
دکتر سمیه حسن‌آبادی

خرداد ۱۳۹۷



شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

### فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای عافیه آور با شماره دانشجویی ۹۴۰۳۰۰۴ رشته فیزیک گرایش فیزیک هسته ای تحت عنوان بررسی پتانسیل های تقریبی در واکنش های همجوشی هسته ای که در تاریخ ۱۳۹۷ / ۳ / ۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

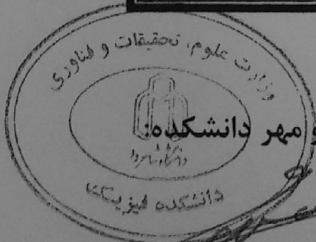
قبول (با درجه: ..... عالی.....)   مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	حسن حسن آبادی	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	سمیه حسن آبادی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	احسان ابراهیمی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	مسلم سوهانی	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	حسین توکلی عنبران	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی مومنی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم بہ

او کہ آموخت مرا تا بیا موزم

استاد گرامی جناب آقای دکتر حسن حسن آبادی

روح پاک پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم

مادرم، دریای بی کران فداکاری کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر

برادر عزیزم کہ ہموارہ در طول تحصیل متحمل زحمتم بود و وجودش مایہی دلگرمی من است

خواهران عزیزم کہ وجودشان شادی بخش و صفایشان مایہ آرامش من است

## سپاس گزارمی...

نهال را "باران" باید تا سیرابش کند از آب حیات و "آفتاب" باید تا تابانند نیرو او محکم کند  
شاخه های تازه روئیده را؛ بسی شایسته است از اساتید فریخته و فرزانه ام، استاد بزرگوارم آقای دکتر  
"حسن حسن آبادی" و خانم دکتر "سمیه حسن آبادی"، آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان  
بودن را معنا کردند تقدیر و تشکر نمایم.

معلمانم قامت ز عرش برتر باد همیشه تو سن اندیشه ات مظفر باد  
به نکته های دلاویز و گفته های بلند صحیفه های سخن از تو علم پرور باد

و باد و دفر او ان بر روح پدر بزرگوارم و سپاس بی کران از مهدی و همراهی و بهگامی مادر دلسوز و مهربانم  
که سجده های ایشان گل محبت راد و وجودم پروراند و دلمان گهربارش لحظه های مهربانی را به من آموخت.  
مادرم هستی من ز هستی تو ست تا، مستم و هستی دارم دست دوست

نگلسار جاودانی مادر است  
چشم سار مهربانی مادر است



## تعهد نامه

اینجانب عافیه آور دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان‌نامه با عنوان بررسی پتانسیل‌های تقریبی در واکنش‌های همجوشی هسته‌ای، تحت راهنمایی حسن حسن‌آبادی و سمیه حسن‌آبادی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگر پژوهش‌گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان‌نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ‌جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود تعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام “دانشگاه صنعتی شاهرود” یا “Shahrood University of Technology” به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آوردن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است)، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

عافیه آور

خرداد ۱۳۹۷

### مالکیت نتایج و حق نشر

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



## چکیده

در این تحقیق به بررسی پتانسیل‌های تقریبی مختلف در واکنش‌های همجوشی هسته‌ای می‌پردازیم. از مدل‌های مختلف پتانسیل تقریبی برای محاسبه ارتفاع و موقعیت سد استفاده می‌کنیم و با تاکید بر اینکه سطح مقطع همجوشی یکی از کمیت‌های مهم در فرآیند همجوشی است سعی می‌کنیم با وارد کردن مدل‌های اصلاحی همچون پتانسیل یوکاواگونه و پتانسیل اصلاح شده وود-ساکسون و با استفاده از روش حداقل مربعات، خطای خود را به کمترین مقدار ممکن رسانده و باعث بهبود سطح مقطع همجوشی هسته‌ها نسبت به روش‌های ارائه شده در این تحقیق شویم. در اینجا هسته‌ها را به صورت کروی فرض کردیم. در همجوشی هسته‌های تغییر شکل یافته، پتانسیل برهمکنش به تغییر شکل هسته‌ها و جهت گیری نسبی هسته‌ها وابسته می‌شوند.

**کلمات کلیدی:** ارتفاع سد، موقعیت سد، سطح مقطع همجوشی، پتانسیل یوکاواگونه، پتانسیل وود-ساکسون اصلاح شده



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1. A. Avar, H. Hassanabadi and S. Hassanabadi "Heavy-ion fusion reactions by using Yukawa form potential " accepted for publication in MPLA.
2. A. Avar, H. Hassanabadi and S. Hassanabadi "The parameterization of Coulomb barrier heights and cross-section using a modified Woods-Saxon potential" submitted.



# فهرست مطالب

ف	فهرست تصاویر
ش	فهرست جداول
۱	۱ همجوشی هسته‌ای
۱	۱.۱ واکنش‌های همجوشی هسته‌ای
۲	۱.۱.۱ مزیت واکنش‌های همجوشی
۲	۲.۱.۱ اشکال واکنش‌های همجوشی
۳	۲.۱ راه‌های غلبه بر سد کولنی
۳	۳.۱ همجوشی خورشیدی
۷	۴.۱ واکنش‌های گرما هسته‌ای روی زمین
۹	۲ معرفی انواع مختلف پتانسیل‌های تقریبی
۱۰	۱.۲ تقریب ۱۹۷۷ (Prox77)
۱۱	۲.۲ تقریب ۱۹۸۸ (Prox88)
۱۲	۳.۲ تقریب ۲۰۰۰ (Prox00)
۱۳	۴.۲ تقریب اصلاح‌شده ۲۰۰۰ (Prox00DP)
۱۳	۵.۲ باس ۱۹۷۳ (Bass73)
۱۳	۶.۲ باس ۱۹۷۷ (Bass77)
۱۴	۷.۲ باس ۱۹۸۰ (Bass80)
۱۵	۸.۲ کریستنسن و وینتر ۱۹۷۶ (CW76)
۱۵	۹.۲ بروگلیا و وینتر ۱۹۹۱ (BW91)
۱۶	۱۰.۲ ایچ‌وینتر (AW95)
۱۶	۱۱.۲ این‌جی‌اُ ۱۹۸۰ (Ng80)
۱۷	۱۲.۲ پتانسیل جدید دنیزوف (DenisovDP)

۱۹	۳	بررسی پتانسیل‌های تقریبی مختلف
۱۹	۱.۳	فرمالیسم
۲۰	۲.۳	تابع کلی
۲۷	۳.۳	نتایج برخورد هسته‌های $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ، $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$
	۴.۳	بررسی سطح مقطع‌های همجوشی برای واکنش‌های $^{40}\text{Ca} + ^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$
۳۰		$^{40}\text{Ca}$
۳۲	۵.۳	پتانسیل تقریبی ProxNew
	۶.۳	بررسی سطح مقطع‌های همجوشی برای واکنش‌های $^{48}\text{Ca} + ^{12}\text{C} + ^{92}\text{Zr}$
۳۸		$^{48}\text{Ca}$
۳۹	۴	پتانسیل‌های تقریبی اصلاح‌شده
۳۹	۱.۴	تابع کلی جدید به صورت پتانسیل یوکاواگونه
	۲.۴	سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل
۴۲		یوکاواگونه
۶۴	۳.۴	پتانسیل جدید به شکل پتانسیل وود-ساکسون اصلاح‌شده
	۴.۴	سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل
۶۶		اصلاح‌شده وودساکسون
۷۴	۵.۴	نتیجه‌گیری
۷۵		مراجع



# فهرست تصاویر

۲	.....	انرژی بستگی متوسط نوکلئون برحسب عدد جرمی	۱.۱
۴	.....	زنجیره پروتون-پروتون درواکنش‌های همجوشی هسته‌ای	۲.۱
۶	.....	چرخه کربن-کربن	۳.۱
۶	..	میزان تولید انرژی از چرخه $p-p$ و چرخه کربن برحسب تابعی از دما	۴.۱
۸	.....	سطح مقطع‌های واکنش‌های همجوشی	۵.۱
		موقعیت سد $R_B$ برحسب جمعی از ریشه متوسط مربع شعاع پرتابه و هسته	۱.۳
۲۳	.....	هدف	
		تفاوت نسبی مکان سد بین نتایج محاسبه شده و نتایج برازش شده به	۲.۳
۲۴	.....	صورت تابعی از مجموع ریشه متوسط مربع پرتابه و هسته هدف	
۲۵	.....	$V_B$ برحسب تابعی از ارتفاع سد کولنی $\frac{Z_1 Z_2}{R_B^{p_{ar}}}$	۳.۳
		تفاوت نسبی ارتفاع‌های سد بین نتایج محاسبه شده و نتایج برازش شده	۴.۳
۲۶	.....	برحسب تابعی از تعداد بار پرتابه و هسته هدف	
		تفاوت نسبی بین ارتفاع‌های سد فرمول پارامتری شده و داده‌های تجربی	۵.۳
۲۶	.....	برحسب تعداد بار پرتابه و هسته هدف	
		بخش هسته‌ای $V_N(r)$ برحسب تابع $r$ برای پتانسیل‌های تقریبی، Bass73،	۶.۳
۲۷	.....	Bass77، Bass80	
		بخش هسته‌ای $V_N(r)$ برحسب تابع $r$ برای پتانسیل‌های تقریبی Ng675	۷.۳
۲۷	.....	Ng680،	
		بخش هسته‌ای $V_N(r)$ برحسب تابع $r$ برای پتانسیل‌های تقریبی، CW76،	۸.۳
۲۸	.....	BW91، AW95	
		بخش هسته‌ای $V_N(r)$ برحسب تابع $r$ برای پتانسیل‌های تقریبی، Prox77،	۹.۳
۲۸	.....	Prox88، Prox00، Prox00Dp	
		پتانسیل برهمکنش کل $V_T(r)$ (هسته‌ای+کولنی) برحسب تابع $r$ برای	۱۰.۳
۲۹	.....	پتانسیل‌های تقریبی CW76، BW91، AW95	

۱۱.۳	پتانسیل برهمکنش کل $V_T(r)$ (هسته‌ای+کولنی) برحسب تابع $r$ برای
۲۹	پتانسیل های تقریبی Prox77 , Prox88 , Prox00 , Prox00Dp . . . . .
۱۲.۳	سطح مقطع های عبوری همجوشی $\sigma(mb)$ برحسب انرژی مرکز جرم $E_{cm}$
۳۱	برای $^{24}Mg + ^{28}Si$ . . . . .
۱۳.۳	سطح مقطع های عبوری همجوشی $\sigma(mb)$ برحسب انرژی مرکز جرم $E_{cm}$
۳۱	برای $^{40}Ca + ^{40}Ca$ . . . . .
۱۴.۳	تغییرات معادل شعاع هسته ای rms، $R_{o.o.i}^{expt}(fm)$ برحسب تابعی از جرم
۳۴	کل هسته $A$ . . . . .
۱۵.۳	درصد انحراف $\Delta R_B(\%)$ برحسب تابعی از جرم کل $A$ . . . . .
۱۶.۳	مقایسه ای از ارتفاع های تئوری سد همجوشی $V_B^{theor}(MeV)$ محاسبه شده
۳۶	با نسخه قدیمی مطابق با مقادیر تجربی $V_B^{expt}(MeV)$ . . . . .
۱۷.۳	مقایسه ای از ارتفاع های تئوری سد همجوشی $V_B^{theor}(MeV)$ محاسبه شده
۳۶	با نسخه اصلاح شده مطابق با مقادیر تجربی $V_B^{expt}(MeV)$ . . . . .
۱۸.۳	مقایسه ای از ارتفاع های تئوری سد همجوشی $V_B^{theor}(MeV)$ محاسبه شده
۳۶	با نسخه جدید مطابق با مقادیر تجربی $V_B^{expt}(MeV)$ . . . . .
۱۹.۳	در صد انحراف $\Delta V_B(\%)$ برحسب تابعی از $Z_1 Z_2$ با استفاده از نسخه های
۳۷	مختلف پتانسیل تقریبی . . . . .
۲۰.۳	تغییرات $\Delta V_B(MeV)$ برحسب تابعی از $Z_1 Z_2$ با استفاده از نسخه های
۳۷	مختلف پتانسیل تقریبی . . . . .
۲۱.۳	سطح مقطع های عبوری همجوشی $\sigma_{fus}(mb)$ برحسب تابعی از $E_{cm}$ با استفاده
۳۸	از نسخه های مختلف پتانسیل تقریبی برای واکنش $^{12}C + ^{92}Zr$ . . . . .
۲۲.۳	سطح مقطع های عبوری همجوشی $\sigma_{fus}(mb)$ برحسب تابعی از $E_{cm}$ با استفاده
۳۸	از نسخه های مختلف پتانسیل تقریبی برای واکنش $^{48}Ca + ^{48}Ca$ . . . . .
۱.۴	بخش هسته ای $V_N(r)$ برای واکنش های $^{12}C + ^{92}Zr$ و $^{26}Mg + ^{30}Si$ . . . . .
۲.۴	برهمکنش کل $V_T(r)$ برای واکنش های $^{12}C + ^{92}Zr$ و $^{26}Mg + ^{30}Si$ . . . . .
۳.۴	مقایسه ارتفاع های سد تئوری $V_B^{theor}(MeV)$ مطابق با مقادیر ارتفاع های
۴۱	سد تجربی $V_B^{expt}(MeV)$ . . . . .
۴.۴	درصد انحراف $\Delta V_B(\%)$ برحسب $Z_1 Z_2$ برای پتانسیل های تقریبی مختلف .
۴۲	تغییرات $\Delta V_B(MeV)$ برحسب $Z_1 Z_2$ برای پتانسیل های تقریبی مختلف .
۶.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های
۵۸	تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{12}C + ^{92}Zr$ . . . . .
۷.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های
۵۸	تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{16}O + ^{92}Zr$ . . . . .

۵۹	۸.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{28}Si + ^{92}Zr$ . . . . .
۵۹	۹.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{24}Mg + ^{28}Si$ . . . . .
۶۰	۱۰.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{24}Mg + ^{30}Si$ . . . . .
۶۰	۱۱.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{26}Mg + ^{28}Si$ . . . . .
۶۱	۱۲.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{26}Mg + ^{30}Si$ . . . . .
۶۱	۱۳.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{28}Si + ^{28}Si$ . . . . .
۶۲	۱۴.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{28}Si + ^{29}Si$ . . . . .
۶۲	۱۵.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{28}Si + ^{30}Si$ . . . . .
۶۳	۱۶.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای پتانسیل های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش $^{16}O + ^{144}Sm$ . . . . .
۶۵	۱۷.۴	بخش هسته‌ای $V_N(r)$ برهمکنش کل برای واکنش $^{24}Mg + ^{28}Si$ . . . . .
۶۶	۱۸.۴	پتانسیل برهمکنش کل (هسته ای + کولنی) $V_T(r)$ برحسب تابع $r$ برای واکنش $^{24}Mg + ^{28}Si$ . . . . .
۶۷	۱۹.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای واکنش $^{16}O + ^{92}Zr$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$ . . . . .
۶۷	۲۰.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای واکنش $^{16}O + ^{98}pb$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$ . . . . .
۶۸	۲۱.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای واکنش $^{16}O + ^{144}Sm$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$ . . . . .
۶۸	۲۲.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای واکنش $^{16}O + ^{154}Sm$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$ . . . . .
۶۹	۲۳.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای واکنش $^{24}Mg + ^{28}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$ . . . . .
۶۹	۲۴.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم برای واکنش $^{26}Mg + ^{28}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$ . . . . .

	۲۵.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{24}Mg+$
۷۰	.....	$^{30}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$
	۲۶.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{26}Mg+$
۷۰	.....	$^{30}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$
	۲۷.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{28}Si+$
۷۱	.....	$^{28}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$
	۲۸.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{28}Si+$
۷۱	.....	$^{29}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$
	۲۹.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{28}Si+$
۷۲	.....	$^{30}Si$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$
	۳۰.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{24}Mg+$
۷۲	.....	$^{24}Mg$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$
	۳۱.۴	سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش $^{24}Mg+$
۷۳	.....	$^{26}Mg$ به همراه میزان خطای برازش $\chi$

# فهرست جداول

۲۱	۱.۳	مقایسه ارتفاع سد پتانسیل های تقریبی مختلف و پتانسیل تقریبی جدید به همراه ارتفاع سد تجربی
۲۲	۲.۳	مقایسه ارتفاع سد پتانسیل های تقریبی مختلف و پتانسیل تقریبی جدید به همراه ارتفاع سد تجربی
۳۳	۳.۳	ضرایب مختلف انرژی سطح موجود مطابق با مقدارهایی که دارند
۴۴	۱.۴	میزان انحراف استاندارد از داده های تجربی برای مدل های تقریبی ProxOld، ProxMod، ProxNew و مدل ما
۴۵	۲.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{24}Mg + ^{28}Si$
۴۶	۳.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{26}Mg + ^{28}Si$
۴۷	۴.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{24}Mg + ^{30}Si$
۴۸	۵.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{26}Mg + ^{30}Si$
۴۹	۶.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{28}Si + ^{28}Si$
۵۰	۷.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{28}Si + ^{29}Si$
۵۱	۸.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{28}Si + ^{30}Si$
۵۲	۹.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{12}C + ^{92}Zr$
۵۳	۱۰.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی های $E_{cm}$ برای واکنش $^{16}O + ^{92}Zr$

	۱۱.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های $E_{cm}$ برای واکنش $^{28}Si +$
۵۴	.....	$^{92}Zr$
	۱۲.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های $E_{cm}$ برای واکنش $^{16}O +$
۵۵	.....	$^{144}Sm$
	۱۳.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های $E_{cm}$ برای واکنش $^{24}Mg +$
۵۶	.....	$^{24}Mg$
	۱۴.۴	سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های $E_{cm}$ برای واکنش $^{24}Mg +$
۵۷	.....	$^{26}Mg$
	۱۵.۴	مقایسه ارتفاع سد پتانسیل‌های تقریبی مختلف و پتانسیل تقریبی اصلاح‌شده
۶۵	.....	به همراه ارتفاع سد تجربی



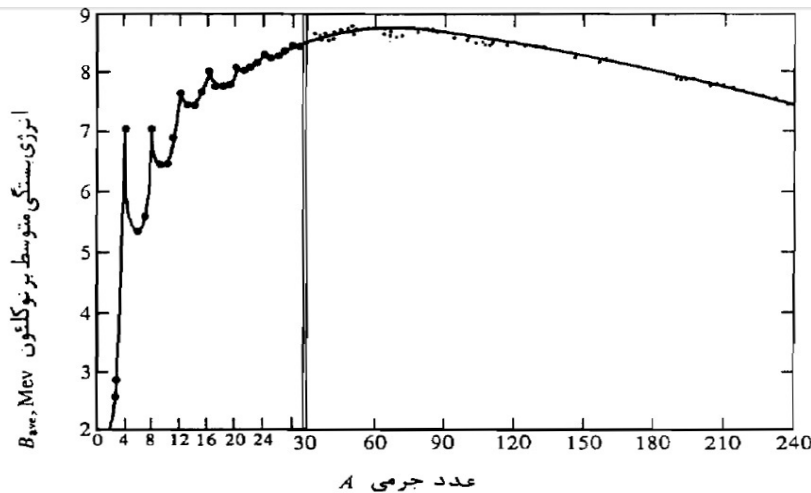
# فصل ۱

## همجوشی هسته‌ای

### ۱.۱ واکنش‌های همجوشی هسته‌ای

یک روش برای استخراج انرژی از هسته‌ها همجوشی هسته‌ای می‌باشد. همجوشی منبع انرژی ایمن و تمیزی است و منابع نامحدودی دارد و انرژی حاصل از آن بسیار بیشتر از سوخت‌های فسیلی، انرژی شکافت و... است. انرژی همجوشی در اثر پیوند هسته‌های سبک بدست می‌آید. در واکنش‌های همجوشی با ترکیب هسته‌های سبک می‌توان از منحنی انرژی بستگی بالا رفت و به طرف هسته‌های پایدار نزدیک شد پایدارترین هسته مربوط به  ${}^{56}\text{Fe}$  است. بنابراین اگر دو هسته سبک را با هم ترکیب کنیم و هسته‌ای با عدد جرمی کمتر از ۵۶ را تشکیل دهیم در این صورت انرژی آزاد می‌شود [۱]. همان‌طور که از منحنی انرژی بستگی در شکل ۱.۱ دیده می‌شود [۲] تغییرات منحنی از اتم هیدروژن شروع می‌شود و حوالی  $A = 56$  به بیشینه مقدار خود می‌رسد و بعد از آن برای ایزوتوپ‌های اورانیوم با شیب ملایم کاهش می‌یابد بنابراین در نیمه چپ منحنی  $A < 56$  همجوشی هسته‌ای و در نیمه راست منحنی  $A > 56$  شکافت هسته‌ای رخ می‌دهد.





شکل ۱.۱: انرژی بستگی متوسط نوکلئون بر حسب عدد جرمی

### ۱.۱.۱ مزیت واکنش‌های همجوشی

همجوشی دارای چند مزیت واضح نسبت به فرآیند شکافت است هسته‌های سبک فراوان‌اند و به آسانی قابل دسترسی‌اند و همچنین محصولات نهایی همجوشی هسته‌های سبک پایدارند نه هسته‌های سنگین پرتوزا. در واقع از دیرباز آرزوی بشریت دستیابی به منبع انرژی بوده است که علاوه بر آن که بتوان به مدت طولانی از آن استفاده کنند پسماندهای خطرناک نیز در پی نداشته باشد [۱].

### ۲.۱.۱ اشکال واکنش‌های همجوشی

اشکال واکنش‌های همجوشی هسته‌ای این است که هسته‌ها قبل از این که بتوانند با هم ترکیب شوند باید بر دافعه کولنی یکدیگر غلبه کنند در واقع چیزی که باعث می‌شود رسیدن به فناوری همجوشی هسته‌ای مشکل باشد عدم علاقه هسته‌ها به جوش خوردن با یکدیگر است. برای مثال اتم هیدروژن دارای یک پروتون است و بار الکتریکی مثبت دارد وقتی می‌خواهیم یک هسته اتم هیدروژن را به آن جوش دهیم چون هر دو دارای بار الکتریکی مثبت هستند از جوش خوردن و ترکیب با یکدیگر مقاومت می‌کنند و باید این کار را به زور انجام داد. در واقع به این پروتون‌ها باید آن قدر انرژی داد تا انرژی جنبشی آن بیشتر از نیروی دافعه کولنی شوند و با هم ترکیب شوند [۱].

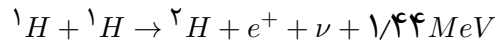
## ۲.۱ راه‌های غلبه بر سد کولنی

در واکنش‌های همجوشی مشکل این است که هسته‌های همجوشی کننده دارای بار الکتریکی مثبت هستند و به شدت یکدیگر را دفع می‌کنند بنابراین در شرایط عادی فاصله بین هسته‌ها زیاد بوده و امکان واکنش‌های همجوشی هسته‌ای وجود ندارد. اگر دو هسته  ${}^2\text{Ne}$  را در نظر بگیریم که با هم واکنش دهند و هسته  ${}^4\text{Ca}$  را حاصل شود از این واکنش  $20\text{MeV}$  انرژی آزاد می‌شود اما قبل از این که دو هسته به هم نزدیک شوند و با هم ترکیب شوند در ناحیه‌ای که سطح دو هسته در تماس با یکدیگر قرار دارند نیروی دافعه کولنی متقابل  $21/2\text{MeV}$  است. اگر می‌توانستیم واکنش هسته‌ای را طوری انجام دهیم که در آن دو هسته  ${}^2\text{Ne}$  با انرژی جنبشی کل  $21/2\text{MeV}$  به یکدیگر نزدیک شوند، انرژی نهایی سیستم  $41/9\text{MeV}$  می‌شد که معرف  $21/2\text{MeV}$  انرژی اولیه و  $20\text{MeV}$  انرژی آزاد شده از واکنش‌های همجوشی است. در واقع به نظر می‌رسد که شتاب دادن یک هسته  ${}^2\text{Ne}$  مسئله مهمی نباشد اما می‌دانیم که شتاب‌دهنده‌های یون سنگین باریکه‌هایی در حد نانوامپر و میکروآمپر تولید می‌کنند و در واقع این یک ایراد است که نتوان  ${}^2\text{Ne}$  با انرژی جنبشی  $21/2\text{MeV}$  تولید کرد. روش دیگر این است که به هسته  ${}^2\text{Ne}$  آن قدر انرژی گرمایی دهیم تا بتواند بر سد کولنی غلبه کند و همجوشی صورت گیرد. به واکنش‌های همجوشی که برای غلبه بر سد کولنی از گرما و افزایش دما استفاده می‌شود همجوشی گرما هسته‌ای گفته می‌شود. اما دوباره مشکل اینجاست که تامین این دما کاری غیر ممکن است مثلاً برای این که دو پروتون به هم نزدیک شوند  $0/4\text{MeV}$  انرژی باید بدهیم که معادل دمای  $4/64 \times 10^9\text{K}$  است که وقتی دو هسته سنگین‌تر بخواهند به هم نزدیک شوند دمایی که لازم است از این مقدار هم بیشتر خواهد بود که رسیدن به این دما کاری غیرممکن است. واکنش‌های همجوشی در خورشید منجر به تولید مقادیر زیادی انرژی می‌شود که به دلیل وجود دما و فشار بسیار زیاد خورشید و همچنین تعداد بسیار زیاد ذرات در واحد حجم احتمال وقوع واکنش‌های همجوشی بسیار زیاد است. بنابراین یکی از راه‌های افزایش انرژی برخوردی بین ذرات یا غلبه بر سد کولنی افزایش دما می‌باشد که در این صورت سرعت نسبی ذرات زیاد می‌شود و همچنین برای این که واکنش‌های همجوشی آهنگ مناسبی داشته باشد باید چگالی ذرات همجوشی شونده را افزایش دهیم که در این صورت احتمال برخورد بین ذرات نیز زیاد می‌شود [۱].

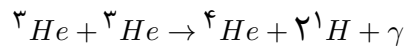
## ۳.۱ همجوشی خورشیدی

محاسبات برپایه تئوری نشان می‌دهد که در مرکز ستاره‌ای شبیه خورشید چگالی حدود  $100 \frac{g}{cm^3}$  و دما حدوداً ۱۲ میلیون درجه کلوین است. حدود ۹۹/۹٪ از همه اتم‌های موجود در جهان از هیدروژن و هلیوم هستند (به ترتیب نسبت ۱۰ به ۱). ماده اصلی مورد توجه هیدروژن یا

پروتون است زیرا اتم‌ها در این دما یونیزه می‌شوند [۳]. مرحله‌ی اول در فرآیند همجوشی باید ترکیب دو پروتون باشد که تنها سیستم دو نوکلئونی پایدار خواهد ساخت.

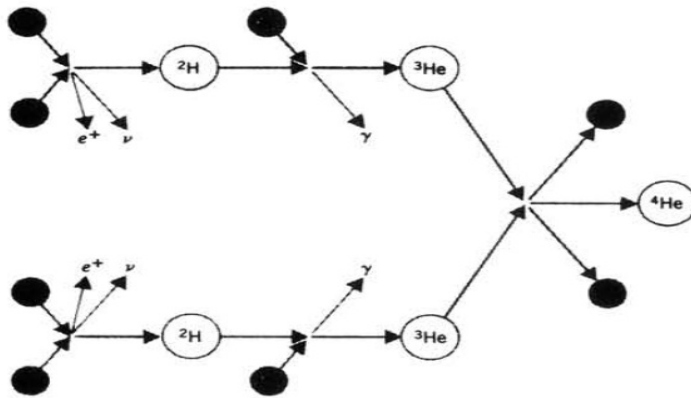


حضور  $\nu$  در حالت نهایی نشانه یک فرآیند برهمکنشی ضعیف است که باید طی تبدیل یک پروتون به یک نوترون صورت گرفته باشد. سطح مقطع فرآیندهای برهمکنشی ضعیف خیلی کوچک است [۱]. چون که تعداد دوترون‌ها در واقع چگالی دوترون‌ها خیلی پایین است و عملاً می‌توان گفت که واکنش  $d-d$  غیر محتمل است. به ازای هر  $10^{18}$  پروتون یک دوترون تشکیل می‌شود بنابراین  $10^{18}$  مرتبه احتمال بیشتری وجود دارد که دوترون با یک پروتون ترکیب شود تا این که بخواهد با دوترونی دیگر واکنش دهد. اما  ${}^3\text{He}$  تشکیل شده نمی‌تواند با  ${}^1\text{H}$  واکنش دهد چون که  ${}^4\text{Li}$  به صورت یک سیستم مقید وجود ندارد و دوباره به همان  ${}^3\text{He}$  و  ${}^1\text{H}$  شکسته می‌شود از طرفی احتمال این که با دوترون واکنش دهد تقریباً به دلیل چگالی کم دوترون‌ها غیر محتمل است بنابراین یکی از کارهایی که می‌تواند انجام دهد آن است که مدتی منتظر بماند تا یک  ${}^3\text{He}$  دیگری ساخته شود که با آن واکنش دهد [۱].



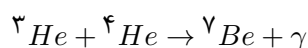
چرخه پروتون - پروتون به صورت طرحواره در شکل ۲.۱ نشان داده شده است [۱].

همجوشی خورشیدی

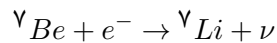


شکل ۲.۱: زنجیره پروتون-پروتون در واکنش‌های همجوشی هسته‌ای

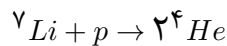
هسته  ${}^3\text{He}$  می‌تواند با یک ذره آلفا واکنش دهد و پس از انجام چند واکنش به هسته  ${}^4\text{He}$  تبدیل شود بدین صورت که :



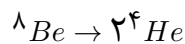
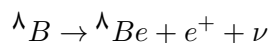
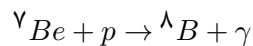
که  ${}^7\text{Be}$  می‌تواند با گیراندازی الکترون به  ${}^7\text{Li}$  تبدیل شود.



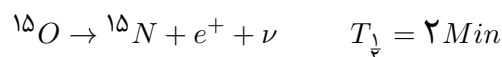
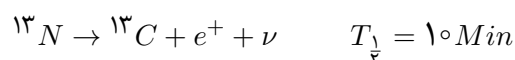
که در نتیجه  ${}^7\text{Li}$  که با پروتون واکنش دهد می‌تواند دو هسته  ${}^4\text{He}$  را نتیجه دهد.



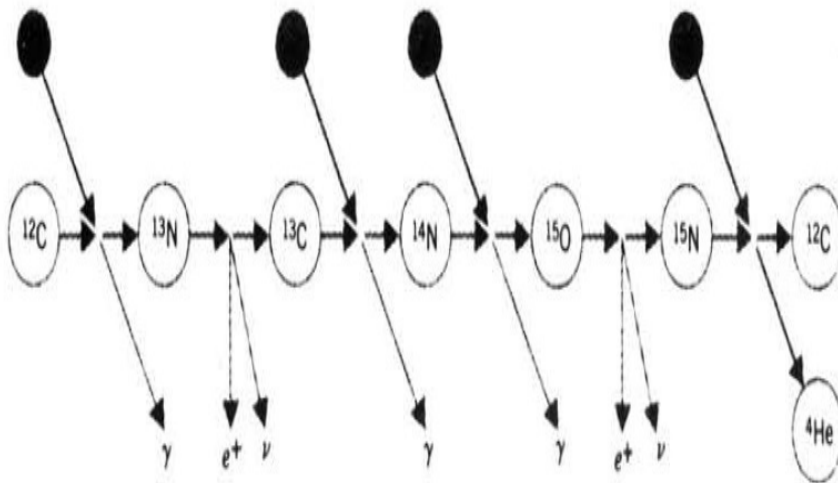
و یا این که زنجیره می‌تواند به صورت زیر دنبال شود که به جای این که  ${}^7\text{Be}$  با گیراندازی الکترون به  ${}^7\text{Li}$  تبدیل شود می‌تواند با یک پروتون واکنش دهد و به  ${}^8\text{B}$  تبدیل شود.



اما مقدار Q برای هر سه این مسیرها یکسان است اما اینکه کدام زنجیره اتفاق بیافتد به ترکیب ستاره و دمای آن بستگی دارد [۱].  
از آن جا که خورشید دارای بسیاری از عناصر غیر از هیدروژن است بسیاری از واکنش‌های دیگر نیز وجود دارد.

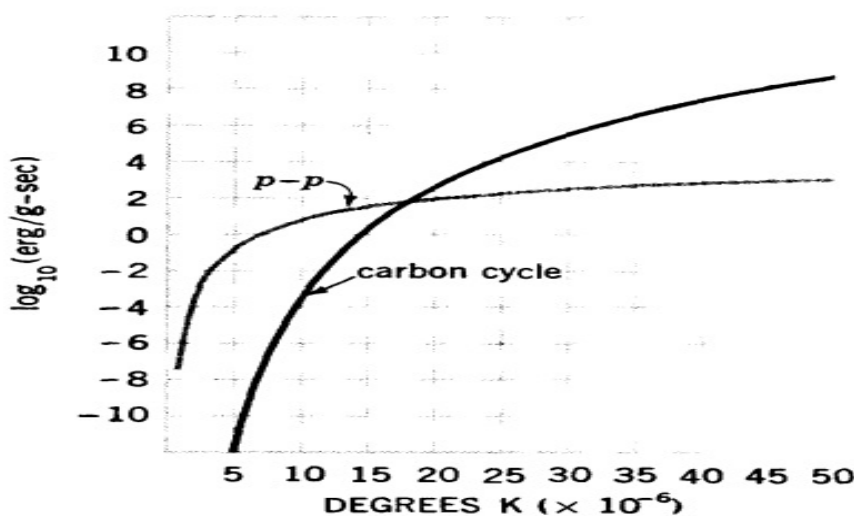


می‌بینیم که  ${}^{12}\text{C}$  به صورت یک کاتالیزور عمل می‌کند چون که در فرآیند نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و دوباره چهار پروتون منجر به تشکیل هلیوم می‌شود [۳] که به صورت طرحواره در شکل ۳.۱ می‌بینیم [۱].



شکل ۳.۱: چرخه کربن-کربن

در شکل ۴.۱ هم نرخ تولید انرژی در دماهای مختلف زمانی که تراکم پروتون‌ها  $10^{26} \frac{g}{cm^3}$  و تراکم  $^{12}\text{C}$   $1 \frac{g}{cm^3}$  است در نزدیکی منطقه مرکزی خورشید نشان داده شده است. دیده می‌شود که منحنی چرخه کربن با درجه حرارت بسیار بالاتر از دمای موردنظر افزایش می‌یابد. می‌بینیم که برای درجه حرارت بیش از ۱۸ میلیون درجه چرخه کربن تولیدکننده انرژی غالب است که چنین درجه حرارتی در ناحیه مرکزی ستاره که حدود  $50^\circ$  درصد یا بیشتر از خورشید است رخ می‌دهد. بنابراین چرخه کربن در دماهای خیلی بالا غالب است [۳].

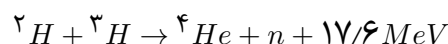
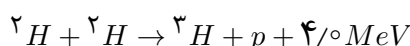
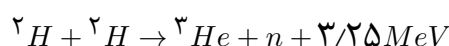


شکل ۴.۱: میزان تولید انرژی از چرخه  $p-p$  و چرخه کربن برحسب تابعی از دما

## ۴.۱ واکنش‌های گرما هسته‌ای روی زمین

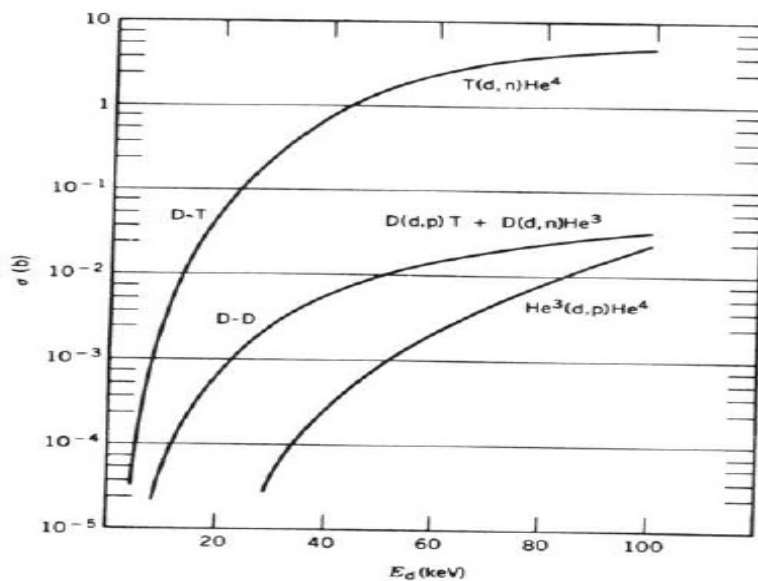
تمدن ما انرژی را به میزان بسیار زیاد و سرعت زیادی مصرف می‌کند و روشن است تامین منابع سوخت معمولی تمیز ما محدود است. برآورد شده بود که در سال‌های ۲۰۰۰ – ۱۹۵۰ همان‌طور که در تمام تاریخ‌های گذشته سوخت مصرف می‌شده مصرف سوخت در نیمه اول قرن ۲۱ چندین برابر خواهد شد. با این میزان ذخیره سوخت‌های معمولی می‌تواند بیش از یک یا دو قرن دیگر ادامه یابد. تنها راه‌حل این مشکل این است که روش‌های استفاده از واکنش‌های هسته‌ای برای تولید انرژی را افزایش دهیم. از آن‌جایی که انرژی در ستارگان به طور فراوان تولید می‌شود ممکن است که انتظار داشته باشیم از همین روش‌ها استفاده کنیم اما روشن است که این ناامید کننده است. چگالی  $100 \frac{g}{cm^3}$  هرگز در زمین بدست نیامده و یا حتی به آن نزدیک نشده‌اند به جز آن دمای  $10^8$  میلیون درجه یک منبع سوخت که به  $10^8$  میلیارد سال برای سوختن دارد نیاز است که روی زمین غیر ممکن است [۳].

مطلوب‌ترین واکنش‌ها واکنش بین دوتا دوتریم (d-d) و واکنش دوتریم – تریتیوم (d-t) است.



هر چه محصول نهایی پایدارتر باشد انرژی آزاد شده از واکنش‌های همجوشی هسته‌ای بیشتر است برای مثال واکنش  $d-t$  به آزادسازی انرژی زیادی منجر می‌شود.

سطح مقطع در واقع معیاری است که احتمال نسبی وقوع واکنش را نشان می‌دهد و همان‌طور که از شکل ۵.۱ دیده می‌شود احتمال وقوع واکنش  $d-t$  و هم‌چنین انرژی آزادسازی آن بیشتر از واکنش‌های دیگر است [۱]. بنابراین برای تولید انرژی گرما هسته‌ای باید مخلوطی از گازهای  ${}^2H$  و  ${}^3H$  را در دماهای گرما هسته‌ای ایجاد کنیم در دماهای گرما هسته‌ای اتم‌ها به‌طور کامل یونیزه می‌شوند بنابراین در این دما پلاسما که گازی از هسته و الکترون است تشکیل می‌شود. اگر انرژی تولید شده در پلاسما به وسیله انرژی تولید شده در واکنش حفظ شود سرعت واکنش باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند بر انرژی آزاد شده از این سیستم با اثر برخورد الکترون-یون با شدت بالا غلبه کند. که این نیاز به درجه حرارت  $10^8$  درجه  $(KT \approx 10 KeV)$  دارد برای تولید مقادیر جالب در این دما چگالی ذرات باید حداقل از  $10^{15} \frac{ذره}{cm^3}$  باشد. میانگین طول عمر یک ذره در این شرایط محاسبه شده و حدود  $10^8$  s برای  $d-t$  و  $10^{10}$  s برای  $d-d$  است. اگر یک سیستم از این نوع بتواند ساخته شود منابع سوختی هیچ مشکلی نخواهند داشت. دوتریم به عنوان  $15\%$  قسمت در میلیون در هیدروژن طبیعی موجود است چون که هیدروژن جزء اصلی آب است و دو سوم کره زمین هم از آب تشکیل شده بنابراین دوتریم را به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌توان بدست آورد [۳]، تریتیوم هم از برهمکنش نوترون با لیتیم



شکل ۵.۱: سطح مقطع‌های واکنش‌های همجوشی

در پوشش رآکتورهای همجوشی بدست می‌آید. در رآکتورهای همجوشی از واکنش‌های  $d-t$  استفاده می‌شود چون که به آزاد سازی انرژی زیادی منجر می‌شود. اما یک اشکالی که دارد این است که سهم بیشتر انرژی را محصول سبک‌تر که در این جا نوترون باشد می‌برد که استخراج آن عملاً آسان نخواهد بود برعکس شکافت هسته‌ای که نوترون‌ها انرژی کمی با خود حمل می‌کند و بیشترین انرژی مربوط به پاره‌های شکافت است که به آسانی قابل استخراج می‌باشد. وقتی که سوخت هیدروژن مصرف شده باشد مرحله بعد همجوشی هلیوم است به علت بزرگ‌تر بودن سد کولنی واکنش‌های هلیوم نسبت به هیدروژن، همجوشی هلیوم در ستاره‌های داغ‌تر روی می‌دهد [۱].

## فصل ۲

# معرفی انواع مختلف پتانسیل‌های تقریبی

### مقدمه

امروزه واکنش‌های همجوشی یون سنگین یکی از موضوعات مورد علاقه محققان است بسیاری از آزمایشات و محاسبات نظری اطلاعات کاملی از واکنش همجوشی زیر سد یون سنگین را ارائه می‌کند [۴، ۵]. برخی علاقه‌مندان روی تولید و واپاشی از هسته فوق سنگین تمرکز کرده‌اند که با استفاده از یون پرتو رادیواکتیو می‌توان هسته با نوترون غنی / کم تولید کرد که می‌توان پدیده‌های جالبی اطراف سد کولنی مشاهده کرد [۶-۸]. تعیین دقیق پتانسیل برهمکنش بین دوهسته کار سختی است و تلاش‌های زیادی در این راه نیاز است این موضوع تحقیق بسیار فعال در طول سه دهه گذشته بوده و یکی از موضوعاتی است که در فیزیک یون سنگین بطور گسترده با انرژی کم مطالعه می‌شود [۹-۱۶]. برای واکنش‌های همجوشی ارتفاع و موقعیت سد دو کمیت مهم هستند. ارتفاع سد و موقعیت سد می‌تواند از توزیع سیستم‌های همجوشی تعیین شود. پتانسیل کل مجموع دوربرد نیروی دافعه کولنی و کوتاه‌برد جاذبه هسته‌ای است و ماکزیمم مقدار مربوط به ارتفاع سد که شعاع مربوط به آن موقعیت سد را می‌دهد. بخش کولنی پتانسیل شناخته شده است و می‌توان دقیقاً بدست آورد در حالی که بخش هسته‌ای آن به وضوح قابل درک نیست و تلاش‌های زیادی برای ارائه یک فرم ساده و دقیق از بخش



هسته‌ای از پتانسیل برهمکنش صورت گرفته است. برای محاسبه پتانسیل روش‌های زیادی در حال حاضر وجود دارد مثل مدل دابل فولدینگ<sup>۱</sup> [۱۷-۱۹] مدل قطره‌مایع<sup>۲</sup> [۲۰-۲۲] ، پتانسیل‌های تقریبی مختلف<sup>۳</sup> [۲۳، ۲۴] که پتانسیل‌های تقریبی اغلب برای واکنش‌های همجوشی استفاده شده‌اند. شی<sup>۴</sup> و سویتکی<sup>۵</sup> [۲۵] اولین بار پتانسیل تقریبی را در روش تجربی و بعد از آن گوپتا<sup>۶</sup> و همکارانش [۲۶، ۲۷] مشابه آن را بطور کاملاً گسترده‌تر برای بیش از یک دهه در مدل خوشه‌ای قبلاً تشکیل شده<sup>۷</sup> استفاده کردند. علاوه بر این پتانسیل تقریبی در معرض اصلاحات مختلف قرار گرفته است. دات<sup>۸</sup> و پوری<sup>۹</sup> [۱۰، ۲۸] از نسخه‌های مختلف پتانسیل تقریبی برای مطالعه سطح مقطع‌های همجوشی از ترکیب‌های مختلف پرتابه و هدف استفاده کردند. با گذشت زمان تغییرات و اصلاحاتی روی تقریب اصلی پتانسیل ۱۹۷۷ برای حذف اختلاف بین نظریه و داده انجام شده است که آن شامل یا فرم بهتر از ضریب انرژی سطح [۱۵]، یا تابع کلی و یا شعاع هسته‌ای است [۱۶]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این پارامترها کاملاً اختیاری در مقالات اختیار می‌شوند در این میان ضریب انرژی سطح در زمان‌های مختلف به شکل‌های مختلفی موجود هستند که آن روی ارتفاع سد و سطح مقطع‌ها بطور قابل توجهی اثر می‌گذارد [۱۱، ۱۲] شعاع هسته‌ای هم در شکل‌های مختلفی وجود دارند این شکل‌ها با توجه به ضرایب آن، جرم‌ها یا وابستگی ایزواسپین متفاوت است [۹-۱۲]. سومین پارامتر تابع کلی هم توسط نویسندگان مختلف [۹، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۶] بهبود یافته است. در این بخش جزئیاتی از انواع مختلف پتانسیل‌های تقریبی را که برای محاسبه ارتفاع سد استفاده می‌شوند را ارائه می‌کنیم. وقتی که دو سطح به هم نزدیک می‌شوند در حالی که فاصله آن ۲-۳ fm است نیروی اضافی که ناشی از نزدیکی دوسطح است با پتانسیل تقریبی برچسب زده می‌شود. که در ادامه راجع جزئیات آن بحث می‌شود [۲۹].

## ۱.۲ تقریب ۱۹۷۷ (Prox77)

اساس پتانسیل تقریبی قضیه‌ای است که بر اساس آن بخش هسته‌ای از پتانسیل برهمکنش محصول فاکتورهندسی مربوط به متوسط منحنی از برهمکنش سطح و تابع کلی (وابسته به فاصله جدایی  $r$ ) است و از جرم‌های هسته برخورد کننده مستقل است. طبق نسخه اصلی

<sup>1</sup>double folding model

<sup>2</sup>liquid drop model

<sup>3</sup>proximity potentials

<sup>4</sup>Shi

<sup>5</sup>Świątecki

<sup>6</sup>Gupta

<sup>7</sup>preformed cluster model (PCM)

<sup>8</sup>Dutt

<sup>9</sup>Puri

پتانسیل تقریبی ۱۹۷۷<sup>۱۰</sup> [۱۳] پتانسیل برهمکنشی  $V_N(r)$  بین دو سطح به صورت زیر است.

$$V_N(r) = 4\pi\bar{R}\gamma b\phi\left(\frac{r - C_1 - C_2}{b}\right) (MeV), \quad (1.2)$$

$\bar{R}$  شعاع متوسط منحنی و به فرم زیر است.

$$\bar{R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.2)$$

و  $C_i$  شعاع ماده است

$$C_i = R_i \left[ 1 - \left(\frac{b}{R_i}\right)^2 + \dots \right], \quad (3.2)$$

$R_i$  هم شعاع تیز موثر است

$$R_i = 1/28 A_i^{1/3} - 0/76 + 0/8 A_i^{-1/3}, \quad (i = 1, 2) \quad (4.2)$$

در معادله (۱.۲)،  $\phi(\xi)$  تابع کلی است که تنها به سطوح جدایی هسته برخوردکننده وابسته است.  $\gamma$  ضریب انرژی سطح وابسته به نوترون - پروتون است.

$$\gamma = \gamma_0 \left[ 1 - k_s \left(\frac{N - Z}{N + Z}\right)^2 \right] \quad (5.2)$$

$N, Z$  تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌ها هستند که در تقریب ۱۹۷۷  $MeV/fm^2$   $\gamma_0 = 0/9517$  و  $k_s = 1/7826$  در نظر گرفته شدند.  $\phi(\xi)$  تابع کلی هم به شکل زیر است.

$$\phi(\xi) = \begin{cases} -\frac{1}{4}(\xi - 2/54)^2 - 0/0852(\xi - 2/54)^3, & \xi \leq 1/2511 \\ -3/437 \exp\left(\frac{-\xi}{0/75}\right), & \xi \geq 1/2511 \end{cases} \quad (6.2)$$

عرض سطح  $b$  نزدیک واحد ارزیابی شده است. با استفاده از فرم بالا بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  از برهمکنش را حساب می‌کنیم که این مدل اشاره به Prox77 دارد.

## ۲.۲ تقریب ۱۹۸۸ (Prox88)

ضرایب  $\gamma_0$  و  $k_s$  سال ۱۹۸۱ توسط مولر<sup>۱۱</sup> و نیکس<sup>۱۲</sup> اصلاح شدند [۳۰] و مقادیر  $\gamma_0 = 0/9517$  و  $k_s = 2/3$  و  $MeV/fm^2$   $1/2496$  را به خود گرفتند. که رزیدوف<sup>۱۳</sup> [۱۵] این نسخه اصلاح‌شده را تقریب ۱۹۸۸<sup>۱۴</sup> نامید.

<sup>10</sup>Proximity1977 (Prox77)

<sup>11</sup>Möller

<sup>12</sup>Nix

<sup>13</sup>Reisdorf

<sup>14</sup>Proximity1988 (Prox88)

## ۳.۲ تقریب ۲۰۰۰ (Prox00)

مایرز<sup>۱۵</sup> و سویتکی<sup>۱۶</sup> [۱۶] معادله (۱.۲) را با دانش شعاع هسته‌ای و کشش سطحی با استفاده از مفهوم مدل قطره مایع اصلاح کردند. با استفاده از مدل قطره مایع [۳۱، ۳۲] شعاع ماده‌ای  $C_i$  به صورت زیر محاسبه شد.

$$C_i = c_i + \frac{N_i}{A_i} t_i, \quad (i = 1, 2) \quad (7.2)$$

که  $c_i$  نشان‌دهنده شعاع نیم‌چگالی از توزیع بار و  $t_i$  پوست نوترونی از نوکلئون‌هاست. شعاع بار هسته‌ای با رابطه زیر داده می‌شود [۳۳].

$$R_{o.o.i} = \sqrt{\frac{5}{3}} \langle r^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \quad (8.2)$$

$$= 1/24 \cdot A_i^{\frac{1}{3}} \left\{ 1 + \frac{1/646}{A_i} - 0/191 \left( \frac{A_i - 2Z_i}{A_i} \right) \right\} fm, \quad (i = 1, 2)$$

که  $\langle r^2 \rangle$  متوسط مربع شعاع بار هسته‌ای را نمایش می‌دهد. معادله (۸.۲) تنها برای هسته‌های زوج-زوج با  $38 < Z < 8$  معتبر است. برای هسته با  $Z \geq 38$  معادله بالا توسط پومورسکی<sup>۱۷</sup> و همکارانش به صورت زیر اصلاح شد [۳۳].

$$R_{o.o.i} = 1/256 A_i^{\frac{1}{3}} \left\{ 1 - 0/202 \left( \frac{A_i - 2Z_i}{A_i} \right) \right\} fm \quad (i = 1, 2) \quad (9.2)$$

این عبارت اندازه‌گیری متوسط مربع شعاع بار هسته‌ای  $\langle r^2 \rangle$  را بسیار خوب برآورد می‌کند. در مدل فعلی نویسندگان تنها از معادله (۸.۲) استفاده می‌کنند. شعاع نیم‌چگالی هم با رابطه زیر بدست می‌آید.

$$c_i = R_{o.o.i} \left( 1 - \frac{7}{2} \frac{b^2}{R_{o.o.i}^2} - \frac{49}{8} \frac{b^4}{R_{o.o.i}^4} + \dots \right), \quad (i = 1, 2) \quad (10.2)$$

با استفاده از مدل قطره مایع پوسته نوترونی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$t_i = \frac{3}{4} r_o \left[ \frac{J I_i - \frac{1}{12} c_1 Z_i A_i^{-\frac{1}{3}}}{Q + \frac{9}{4} J A_i^{-\frac{1}{3}}} \right], \quad (i = 1, 2) \quad (11.2)$$

که  $r_o = 1/14 fm$  و مقدار ضریب انرژی متقارن هسته‌ای  $J = 32/65 MeV$  و  $c_1 = \frac{3e^2}{8r_o}$  است. ضریب سختی پوست نوترونی  $Q$  هم  $35/4 MeV$  گرفته می‌شود و ضریب انرژی سطح هسته‌ای هم با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\gamma = \frac{1}{4\pi r_o^2} \left[ 18/63 (MeV) - Q \frac{(t_1^2 + t_2^2)}{2r_o^2} \right] \quad (12.2)$$

<sup>15</sup>Myers

<sup>16</sup>Świątecki

<sup>17</sup>Pomorski

و تابع کلی  $\phi(\xi)$  به صورت زیر است.

$$\phi(\xi) = \begin{cases} -0/1353 + \sum_{n=0}^5 [c_n/(n+1)] (2/5 - \xi)^{n+1} & 0 < \xi \leq 2/5 \\ -0/09551 \exp[(2/75 - \xi)/0/7176] & \xi > 2/5 \end{cases} \quad (13.2)$$

که مقدار ثابت‌های مختلف  $c_n$ ؛  $c_0 = -0/1886$ ،  $c_1 = -0/2628$ ،  $c_2 = -0/15216$ ،  $c_3 = -0/04562$ ،  $c_4 = 0/069136$  و  $c_5 = -0/011454$  است. این پتانسیل تقریبی با تقریب ۲۰۰۰<sup>۱۸</sup> برچسب زده شد.

## ۴.۲ تقریب اصلاح شده ۲۰۰۰ (Prox00DP)

رویر<sup>۱۹</sup> و ریسو<sup>۲۰</sup> معادله (۸.۲) را به شکل رابطه زیر اصلاح کردند. [۳۴]

$$R_{00i} = 1/2332 A_i^{1/2} \left\{ 1 + \frac{2/348443}{A_i} - 0/151541 \left( \frac{A_i - 2Z_i}{A_i} \right) \right\} fm \quad (i = 1, 2) \quad (14.2)$$

که این نسخه با تقریب اصلاح شده ۲۰۰۰<sup>۲۱</sup> برچسب زده شد [۹].

## ۵.۲ باس ۱۹۷۳ (Bass73)

این مدل بر پایه فرض مدل قطره مایع است [۳۵، ۳۶]. در این جا تغییر در انرژی سطح دو پاره که ناشی از جدایی متقابل آن‌هاست و با عامل نمایی نمایش داده می‌شود.

$$V_N(r) = -\frac{d}{R_{12}} a_s A_1^{1/2} A_2^{1/2} \exp\left(-\frac{r - R_{12}}{d}\right), MeV \quad (15.2)$$

با  $R_{12} = r_0 (A_1^{1/2} + A_2^{1/2})$ ؛  $d = 1/35 fm$ ،  $a_s = 17/0 MeV$  و  $r_0 = 1/07 fm$  که این پتانسیل باس ۷۳<sup>۲۲</sup> نامیده شد.

## ۶.۲ باس ۱۹۷۷ (Bass77)

در این مدل پتانسیل نوکلئون-نوکلئون از اطلاعات تجربی برپایه سطح مقطع‌های عبوری همجوشی با استفاده از مدل قطره مایع و استدلال‌های هندسی گرفته شده است که بخش

<sup>18</sup>Proximity2000 (Prox00)

<sup>19</sup>Royer

<sup>20</sup>Rousseau

<sup>21</sup>Modified Proximity 2000 (Prox 00DP)

<sup>22</sup>Bass 1973 (Bass 73)

هسته‌ای پتانسیل می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۳۷].

$$\begin{aligned} V_N(r) &= -4\pi\gamma \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} f(r - R_1 - R_2) \\ &= -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \phi(r - R_1 - R_2) \text{ MeV} \end{aligned} \quad (16.2)$$

$$\frac{df}{ds} = -1 \quad s = 0 \quad (17.2)$$

$f(s = r - R_1 - R_2)$  و  $\phi(s = r - R_1 - R_2)$  تابع کلی هستند. شعاع  $R_i$  هم به صورت زیر است.

$$R_i = 1/16 A_i^{1/4} - 1/39 A_i^{-1/4} \text{ fm}, \quad (i = 1, 2) \quad (18.2)$$

شکل کلی تابع  $\phi(s)$  به شکل زیر است.

$$\phi(s) = \left[ A \exp\left(\frac{s}{d_1}\right) + B \exp\left(\frac{s}{d_2}\right) \right]^{-1} \quad (19.2)$$

که  $d_2 = 0/65 \text{ fm}$  و  $d_1 = 3/30 \text{ fm}$ ،  $B = 0/0061 \text{ MeV}^{-1} \text{ fm}$ ،  $A = 0/0300 \text{ MeV}^{-1} \text{ fm}$  است توجه شود که  $b=1$  است  $\xi$  و  $s$  مقدارهای یکسانی را تولید می‌کنند. این مدل در توضیح ارتفاع‌های سد، موقعیت‌ها و سطح مقطع‌ها در یک گستره وسیعی از انرژی‌ها و جرم‌های هسته برخوردکننده بسیار موفق است این پتانسیل با باس ۷۷<sup>۲۳</sup> برچسب زده شده است.

## ۷.۲ باس ۱۹۸۰ (Bass80)

شکل پتانسیل Bass۷۷ توسط باس بهبود یافت [۱۵] که  $\phi(s = r - R_1 - R_2)$  جدید به صورت زیر است.

$$\phi(s) = \left[ 0/033 \exp\left(\frac{s}{3/5}\right) + 0/007 \left(\frac{s}{0/65}\right) \right]^{-1} \quad (20.2)$$

با شعاع مرکزی  $R_i$  که به صورت زیر است.

$$R_i = R_s \left( 1 - \frac{0/98}{R_s^2} \right) \quad (i = 1, 2) \quad (21.2)$$

که  $R_s$  همانی است که از معادله (۴.۲) داده می‌شود و این پتانسیل با باس ۸۰<sup>۲۴</sup> برچسب زده می‌شود.

<sup>23</sup>Bass 1977 (Bass 77)

<sup>24</sup>Bass 1980 (Bass 80)

## ۸.۲ کریستنسن و وینتر ۱۹۷۶ (CW76)

کریستنسن<sup>۲۵</sup> و وینتر<sup>۲۶</sup> [۳۸] برهمکنش پتانسیل نوکلئون-نوکلئون را به وسیله آنالیز داده‌های پراکندگی الاستیک یون سنگین براساس استدلال‌های نیمه کلاسیک و شناخت تحلیل مدل نوری از پراکندگی الاستیک بخش حقیقی پتانسیل برهمکنش در یک فاصله مشخص در نظر گرفتند.

بخش هسته‌ای از پتانسیل تجربی که توسط این دو نفر در نظر گرفته شدند به صورت زیر است.

$$V_N^{CW76}(r) = -50 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \phi(r - R_1 - R_2) \text{ MeV} \quad (22.2)$$

این شکل از شعاع هندسی شبیه به باس ۷۷ با پارامتر شعاعی مختلف است.

$$R_i = 1.233 A_i^{1/3} - 0.978 A_i^{-1/3} \quad (i = 1, 2) \quad (23.2)$$

که تابع کلی  $\phi(s)$  به شکل زیر است.

$$\phi(s) = \exp\left(-\frac{r - R_1 - R_2}{0.63}\right) \quad (24.2)$$

که این مدل با CW76 برچسب زده می‌شود.

## ۹.۲ بروگلیا و وینتر ۱۹۹۱ (BW91)

یک نسخه اصلاح‌شده از پتانسیل توسط بروگلیا<sup>۲۷</sup> و وینتر [۱۵] با پتانسیل وودساکسون پارامتری شدند که با استفاده از شرط کمکی سازگار با مقدار ماکسیمم نیروی هسته‌ای پیش بینی شده توسط پتانسیل تقریبی Prox77 بدست آمده است.

$$V_N^{BW91}(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{0.63}\right)} \text{ MeV} \quad (25.2)$$

با

$$V_0 = 16 \pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gamma a \quad (26.2)$$

که  $a = 0.63 \text{ fm}$  است

$$R_0 = R_1 + R_2 + 0.29 \quad (27.2)$$

<sup>25</sup>Christensen

<sup>26</sup>Winther

<sup>27</sup>Brogli

که  $R_i$  به فرم زیر است.

$$R_i = 1/223 A_i^{1/3} - 0/98 A_i^{-1/3} \text{ fm} \quad (i = 1, 2) \quad (28.2)$$

شکل ضریب انرژی سطح  $\gamma$  نسبتاً شبیه به مورد استفاده در Prox77 با اختلافی اندک است.

$$\gamma = \gamma_0 \left[ 1 - k_s \left( \frac{N_p - Z_p}{A_p} \right) \left( \frac{N_t - Z_t}{A_t} \right) \right] \quad (29.2)$$

که  $\gamma_0 = 0/95 \text{ MeV}/\text{fm}^2$  و  $k_s = 1/8$  است که این پتانسیل با BW91 برچسب زده می‌شود.

## ۱۰.۲ ایج‌وینتر (AW95)

وینتر<sup>۲۸</sup> پارامترهای پتانسیل (25.2) را با مقایسه گسترده داده‌های تجربی برای پراکندگی الاستیک یون سنگین تنظیم کرد و مقادیر  $a$  و  $R_i$  را به صورت زیر در نظر گرفت [39].

$$a = \left[ \frac{1}{1/17(1 + 0/53(A_1^{-1/3} + A_2^{-1/3}))} \right] \text{ fm} \quad (30.2)$$

$$R_i = 1/20 A_i^{1/3} - 0/09 \text{ fm} \quad (i = 1, 2) \quad (31.2)$$

که در اینجا  $R_0 = R_1 + R_2$  است و این پتانسیل با AW95<sup>۲۹</sup> برچسب زده می‌شود.

## ۱۱.۲ ان‌جی‌اُ ۱۹۸۰ (Ngô80)

در تلاش‌های اولیه برپایه تصویر میکروسکوپی هسته و فرمالیسم چگالی انرژی، پتانسیل ان‌جی‌اُ<sup>۳۰</sup> و همکارانش از حالت‌های ویژه‌ای برخوردار است [40]. در این مدل محاسبات پتانسیل یون-یون در چهارچوب فرمالیسم چگالی انرژی توسط براکندر<sup>۳۱</sup> و همکارانش با استفاده از یک تقریب ناگهانی انجام می‌شود. پارامتری کردن هسته‌های بالا توسط H.Ngô و Ch.Ngô [41] با استفاده از توزیع چگالی فرمی برای حالت‌های هسته‌ای به صورت زیر بهبود یافت.

$$\rho_{n,p}(r) = \frac{\rho_{n,p}(\circ)}{1 + \exp \left[ (r - C_{n,p})/0/55 \right]} \quad (32.2)$$

که  $C$  نشان دهنده شعاع مرکزی از توزیع که در Prox77 تعریف می‌شود. در اینجا  $\rho_{n,p}(\circ)$  به صورت زیر است.

$$\rho_n(\circ) = \frac{3}{4\pi} \frac{N}{A} \frac{1}{r_{on}^3}; \quad \rho_p(\circ) = \frac{3}{4\pi} \frac{Z}{A} \frac{1}{r_{op}^3} \quad (33.2)$$

<sup>28</sup>Winther

<sup>29</sup>Aage Winther (AW 95)

<sup>30</sup>Ngô

<sup>31</sup>Bruckener

این جی<sup>۱</sup> پتانسیل برهمکنش هسته- هسته را در مفهوم تقریب نشان داد که پتانسیل برهمکنش می تواند با فاکتور هندسی و یک تابع کلی در نظر گرفته شود. بخش هسته ای از پتانسیل پارامتری شده به صورت زیر است [۴۱].

$$V_N^{Ng\theta} (r) = \bar{R}\phi(r - C_1 - C_2) \text{ MeV} \quad (34.2)$$

که  $\bar{R}$  به وسیله معادله (۲.۲) تعریف می شود. شعاع هسته ای  $R_i$  به صورت زیر است.

$$R_i = \frac{NR_{ni} + ZRP_i}{A_i}, \quad (i = 1, 2) \quad (35.2)$$

شعاع تیز برای پروتون ها و نوترون ها هم به صورت زیر است.

$$R_{pi} = r_{\circ pi} A_i^{\frac{1}{4}}; \quad R_{ni} = r_{\circ ni} A_i^{\frac{1}{4}} \quad (36.2)$$

$$r_{\circ pi} = 1/128 \text{ fm}; \quad r_{\circ ni} = 1/1375 + 1/875 \times 10^{-4} A_i \text{ fm} \quad (37.2)$$

فرمول شعاعی فوق برای نوترون ها و پروتون ها به ایزوتوپ وابسته هستند. تابع کلی  $\phi(s = r - C_1 - C_2)$  به صورت زیر است.

$$\phi(s) = \begin{cases} -33 + 5/4(s - s_0)^2 & s < s_0 \\ -33 \exp\left[-\frac{1}{5}(s - s_0)^2\right] & s \geq s_0 \end{cases} \quad (38.2)$$

که  $s_0 = -1/6$  این پتانسیل با این جی<sup>۱</sup>  $8^{\circ}$  برچسب زده می شود.

## ۱۲.۲ پتانسیل جدید دنیزوف (DenisovDP)

دنیزوف [۴۲] محاسبات عددی انجام داد و پتانسیل را براساس  $714^{\circ}$  جفت در تقریب نیمه تجربی پارامتری کرد. در کل ۱۱۹ هسته کروی و نزدیک به کروی در طول خط پایداری از  $16O$  تا  $112Po$  گرفته شدند که بخش هسته ای بین دو هسته کروی به صورت زیر است.

$$V_N(r) = -1/989843 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \phi(r - R_1 - R_2 - 2/65) \times \left[ 1 + 0/003525139 \left( \frac{A_1}{A_2} + \frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{3}{4}} - 0/4113263(I_1 + I_2) \right] \quad (39.2)$$

با

$$I_i = \frac{N_i - Z_i}{A_i} \quad (i = 1, 2) \quad (40.2)$$



و شعاع موثر هسته به صورت رابطه زیر است.

$$R_i = R_{ip} \left( 1 - \frac{3/413817}{R_{ip}^2} \right) + 1/284589 \left( I_i - \frac{0/4 A_i}{A_i + 200} \right) \quad (i = 1, 2) \quad (41.2)$$

که  $R_{ip}$  شعاع پروتون با معادله (۸.۲) محاسبه می شود و  $\phi(s = r - R_1 - R_2 - 2/65)$  به شکل زیر است.

$$\phi(s) = \begin{cases} 1 - s/0.7881663 + 1/229218s^2 - 0/2234277s^3 - 0/1038769s^4 \\ - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (0/1844935s^2 + 0/07570101s^3) \\ + (I_1 + I_2)(0/04470645s^2 + 0/03346870s^3), & -5/65 \leq s \leq 0 \\ [1 - s^2 [0/05410106 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \exp\left(-\frac{s}{1/760580}\right) - 0/5395420(I_1 + I_2) \\ \exp\left(-\frac{s}{2/424408}\right)]] \times \exp\left(-\frac{s}{0.7881663}\right) & s \geq 0 \end{cases} \quad (42.2)$$

که  $R_{Pi}$  و  $R_i$ ،  $Z_i$ ،  $N_i$ ،  $A_i$  به ترتیب عدد جرمی، تعداد نوترون ها، تعداد پروتون ها، شعاع موثر هسته و شعاع پروتون از هدف و پرتابه است. شکل بالا از تابع کلی نه تنها وابسته به فاصله جدایی  $s$  است بلکه وابسته به جرم و محتوای نوترون اضافی نسبی است که این پتانسیل با دنیزوف دی پی<sup>۳۳</sup> برچسب زده می شود.

## فصل ۳

# بررسی پتانسیل‌های تقریبی مختلف

### ۱.۳ فرمالیسم

پتانسیل برهمکنش کل  $V_T(r)$  بین هسته هدف و پرتابه به صورت معادله زیر است.

$$V_T(r) = V_N(r) + V_C(r) = V_N(r) + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (1.3)$$

اولین ترم  $V_N(r)$  که پتانسیل هسته‌ای و دومین ترم  $V_C(r)$  پتانسیل کولنی است که  $V_C(r)$  اگر به صورت زیر محاسبه شود [۴۳].

$$V_C(r) = Z_1 Z_2 e^2 \begin{cases} \frac{1}{r} & r > R_c \\ \frac{1}{2R_c} \left[ 3 - \left( \frac{r}{R_c} \right)^2 \right] & r < R_c \end{cases} \quad (2.3)$$

که  $R_i = \frac{1}{2} \lambda A_i^{\frac{1}{3}} - 0.76 + 0.8 A_i^{-\frac{1}{3}}$ ،  $R_c = R_1 + R_2$  و  $s = r - R_1 - R_2$  و  $\bar{R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$  متوسط شعاع منحنی  $\phi(s)$  یک تابع کلی و  $\gamma = \gamma_0 [1 - k_s I^2]$  با  $\gamma_0 = 0.9517 \text{ MeV} / fm^2$  و ثابت نامتقارن سطح  $V_N(r)$  تابعی از پتانسیل تقریبی برابر است با

$$V_N(r) = 4\pi\gamma b \bar{R} \phi(s) \quad (3.3)$$

که  $\phi(s)$  یک تابع کلی و  $\bar{R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$  متوسط شعاع منحنی  $\phi(s)$  یک تابع کلی و  $\gamma = \gamma_0 [1 - k_s I^2]$  با  $\gamma_0 = 0.9517 \text{ MeV} / fm^2$  و ثابت نامتقارن سطح  $V_N(r)$  تابعی از پتانسیل تقریبی برابر است با  $I = \frac{N-Z}{A}$ ،  $k_s = 1/826$  [۴۴]،  $A = A_1 + A_2$  و  $Z = Z_1 + Z_2$ ،  $N = N_1 + N_2$  که  $A_i, Z_i, N_i$  به ترتیب مربوط به نوترون و پروتون و عددجرمی از پرتابه و هسته هدف است. ( $i=1,2$ )

## ۲.۳ تابع کلی

تابع کلی جدید به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شد [۴۵].

$$\phi(s) = \frac{p_1}{1 + \exp\left(\frac{(s+p_2)}{p_3}\right)} \quad (۴.۳)$$

که  $p_1 = -۷/۶۵$  و  $p_2 = ۱/۰۲$  و  $p_3 = ۰/۸۹$  است [۴۵] که ارتفاع و موقعیت سد را نیز می‌توان از شرایط زیر دنبال کرد.

$$\left. \frac{dV_T(r)}{dr} \right|_{r = R_B^{theor}} = 0, \quad \left. \frac{d^2 V_T(r)}{dr^2} \right|_{r = R_B^{theor}} \leq 0 \quad (۵.۳)$$

تعدادی از سیستم‌های همجوشی با ارتفاع‌های سد تجربی انتخاب شده و پتانسیل‌های تقریبی مختلف به همراه تابع کلی جدید برای محاسبه ارتفاع‌های سد در مقایسه با داده‌های تجربی که در جدول ۱.۳ و ۲.۳ نشان داده شده است استفاده می‌شود. در واقع مقایسه‌ای بین ارتفاع‌های سد بین پتانسیل‌های تقریبی مختلف و تابع کلی جدید و داده‌های تجربی صورت گرفته است. داده‌های تجربی از مرجع [۱۰] گرفته شده است.

اختلاف بین پتانسیل تقریبی فعلی و پتانسیل‌های تقریبی مختلف و داده‌های تجربی مقایسه شده و دیده شد که اختلاف‌های بین پتانسیل تقریبی فعلی و داده‌های تجربی کوچکتر از پتانسیل‌های تقریبی مختلف و داده‌های تجربی هستند. بیشترین اختلاف بین پتانسیل تقریبی فعلی و داده‌های تجربی کمتر از  $\pm ۱/۵ MeV$  و تعدادی هم نزدیک به صفر هستند. در ناحیه سیستم‌های همجوشی سبک بیشترین اختلاف‌ها بین Proxy۷ و داده‌های تجربی بیشتر از  $۴ MeV$  است. برای تعدادی از سیستم‌های همجوشی نتایج BW۹۱ نزدیک به داده‌های تجربی هستند CW۷۶ هم نزدیک به پتانسیل تقریبی فعلی است.

به عنوان یک نتیجه نشان داده شده است که پتانسیل تقریبی فعلی می‌تواند ارتفاع‌های سد را به خوبی محاسبه کند و بهتر از پتانسیل‌های تقریبی دیگر است بعلاوه تابع کلی جدید ساده‌تر از پتانسیل‌های تقریبی دیگر است.

جدول ۱.۳: مقایسه ارتفاع سد پتانسیل‌های تقریبی مختلف و پتانسیل تقریبی جدید به همراه ارتفاع سد تجربی

سیستم‌های همجوشی	$V_B^{exp}$ (MeV)	$V_B$ (MeV)	$V_B^{Prox77}$ (MeV)	$V_B^{Aw95}$ (MeV)	$V_B^{B73}$ (MeV)
${}^9Be + {}^{208}Pb$	۳۸/۲	۳۷/۵	۴۰/۵	۳۹/۲	۳۷/۵
${}^{12}C + {}^{204}Pb$	۵۷/۶	۵۶/۸	۶۰/۷	۵۸/۷	۵۷/۸
${}^{12}C + {}^{92}Zr$	۳۲/۳	۳۰/۹	۳۳/۸	۳۲/۴	۳۰/۲
${}^{16}O + {}^{40}Ca$	۲۳/۱	۲۲/۴	۲۴/۹	۲۳/۷	۲۱/۲
${}^{16}O + {}^{92}Zr$	۴۲/۰	۴۱/۰	۴۴/۳	۴۲/۶	۴۰/۵
${}^{16}O + {}^{144}Sm$	۶۱/۰	۶۰/۰	۶۴/۱	۶۲/۰	۶۱/۰
${}^{16}O + {}^{148}Sm$	۵۹/۸	۶۰/۱	۶۳/۷	۶۱/۶	۶۰/۶
${}^{16}O + {}^{208}Pb$	۷۴/۵	۷۵/۰	۷۹/۳	۷۷/۰	۷۷/۲
${}^{17}O + {}^{144}Sm$	۶۰/۶	۵۹/۶	۶۳/۶	۶۱/۶	۶۰/۵
${}^{19}F + {}^{197}Au$	۸۰/۸	۸۱/۲	۸۵/۶	۸۳/۳	۸۳/۸
${}^{19}F + {}^{208}Pb$	۸۳/۰	۸۳/۵	۸۸/۰	۸۵/۷	۸۶/۳
${}^{28}Si + {}^{92}Zr$	۷۰/۹	۷۰/۲	۷۴/۵	۷۲/۰	۷۱/۴
${}^{28}Si + {}^{144}Sm$	۱۰۴/۰	۱۰۲/۹	۱۰۷/۹	۱۰۴/۹	۱۰۷/۳
${}^{28}Si + {}^{208}Pb$	۱۲۸/۱	۱۲۸/۶	۱۳۳/۹	۱۳۰/۶	۱۳۵/۵
${}^{32}S + {}^{89}Y$	۷۷/۸	۷۸/۰	۸۲/۵	۷۹/۸	۷۹/۷
${}^{34}S + {}^{89}Y$	۷۶/۹	۷۷/۳	۸۱/۷	۷۹/۱	۷۸/۹
${}^{35}Cl + {}^{92}Zr$	۸۲/۹	۸۴/۰	۸۸/۵	۸۵/۵	۸۶/۲
${}^{36}S + {}^{90}Zr$	۷۸/۰	۷۸/۶	۸۲/۹	۸۰/۵	۸۰/۳
${}^{36}S + {}^{96}Zr$	۷۶/۷	۷۷/۷	۸۱/۹	۷۹/۶	۷۹/۲
${}^{40}Ca + {}^{40}Ca$	۵۲/۱	۵۳/۶	۵۷/۸	۵۵/۲	۵۳/۵
${}^{40}Ca + {}^{90}Zr$	۹۶/۹	۹۸/۶	۱۰۳/۵	۱۰۰/۴	۱۰۲/۲
${}^{40}Ca + {}^{96}Zr$	۹۴/۶	۹۷/۴	۱۰۲/۲	۹۹/۲	۱۰۰/۸
${}^{40}Ca + {}^{124}Sn$	۱۱۳/۱	۱۱۸/۰	۱۲۳/۱	۱۱۹/۷	۱۲۳/۳
${}^{40}Ca + {}^{48}Ca$	۵۱/۰	۵۲/۰	۵۵/۶	۵۳/۵	۵۱/۷
${}^{64}Ni + {}^{208}Pb$	۲۳۶/۰	۲۴۲/۰	۲۴۷/۵	۲۴۴/۴	۲۶۱/۹
${}^{70}Zn + {}^{208}Pb$	۲۵۰/۶	۲۵۷/۱	۲۶۲/۵	۲۵۹/۷	۲۷۸/۹
${}^{86}Kr + {}^{208}Pb$	۲۹۹/۲	۳۰۲/۸	۳۰۸/۰	۳۰۵/۵	۳۳۰/۶

جدول ۲.۳: مقایسه ارتفاع سد پتانسیل‌های تقریبی مختلف و پتانسیل تقریبی جدید به همراه ارتفاع سد تجربی

سیستم‌های همجوشی	$V_B^{BW91}$ (MeV)	$V_B^{CW76}$ (MeV)	$V_B^{Dp}$ (MeV)	$V_B^{Ng80}$ (MeV)
${}^9Be + {}^{208}Pb$	۳۹/۱	۳۹/۰	۳۸/۲	۴۰/۸
${}^{12}C + {}^{204}Pb$	۵۸/۱	۵۷/۹	۵۸/۴	۶۱/۱
${}^{12}C + {}^{92}Zr$	۳۲/۳	۳۲/۲	۳۲/۴	۳۴/۰
${}^{16}O + {}^{40}Ca$	۲۳/۷	۲۳/۶	۲۳/۸	۲۴/۹
${}^{16}O + {}^{92}Zr$	۴۲/۳	۴۲/۱	۴۲/۷	۴۴/۵
${}^{16}O + {}^{144}Sm$	۶۱/۲	۶۱/۰	۶۲/۲	۶۴/۶
${}^{16}O + {}^{148}Sm$	۶۰/۹	۶۰/۶	۶۱/۸	۶۴/۱
${}^{16}O + {}^{208}Pb$	۷۵/۸	۷۵/۵	۷۷/۲	۷۹/۸
${}^{17}O + {}^{144}Sm$	۶۰/۸	۶۰/۵	۶۱/۶	۶۴/۰
${}^{19}F + {}^{197}Au$	۸۲/۰	۸۱/۵	۸۳/۵	۸۶/۲۸
${}^{19}F + {}^{208}Pb$	۸۴/۲	۸۳/۷	۸۵/۸	۸۸/۵
${}^{28}Si + {}^{92}Zr$	۷۰/۸	۷۰/۴	۷۲/۴	۷۴/۹
${}^{28}Si + {}^{144}Sm$	۱۰۲/۹	۱۰۲/۳	۱۰۵/۸	۱۰۹/۰
${}^{28}Si + {}^{208}Pb$	۱۲۷/۸	۱۲۷/۰	۱۳۱/۲	۱۳۵/۱
${}^{32}S + {}^{89}Y$	۷۸/۴	۷۸/۰	۸۰/۳	۸۳/۰
${}^{34}S + {}^{89}Y$	۷۷/۷	۷۷/۳	۷۹/۴	۸۲/۲
${}^{35}Cl + {}^{92}Zr$	۸۴/۲	۸۳/۷	۸۶/۳	۸۹/۲
${}^{36}S + {}^{90}Zr$	۷۹/۰	۷۸/۵	۸۰/۶	۸۳/۵
${}^{36}S + {}^{96}Zr$	۷۸/۱	۷۷/۵	۷۹/۷	۸۲/۴
${}^{40}Ca + {}^{40}Ca$	۵۴/۶	۵۴/۳	۵۵/۶	۵۷/۷
${}^{40}Ca + {}^{90}Zr$	۹۸/۵	۹۷/۹	۱۰۱/۳	۱۰۴/۵
${}^{40}Ca + {}^{96}Zr$	۹۷/۲	۹۶/۶	۹۹/۹	۱۰۳/۱
${}^{40}Ca + {}^{124}Sn$	۱۱۷/۱	۱۱۶/۴	۱۲۰/۸	۱۲۴/۳
${}^{40}Ca + {}^{48}Ca$	۵۱/۳	۵۲/۶	۵۲/۰	۵۵/۸
${}^{64}Ni + {}^{208}Pb$	۲۳۷/۷	۲۳۵/۰	۲۴۵/۴	۲۵۲/۰
${}^{70}Zn + {}^{208}Pb$	۲۵۲/۳	۲۴۹/۳	۲۶۰/۴	۲۶۷/۵
${}^{86}Kr + {}^{208}Pb$	۲۹۶/۶	۲۹۲/۷	۳۰۶/۲	۳۱۴/۸

از پتانسیل تقریبی فعلی می‌توان برای محاسبه موقعیت سد  $R_B$  از سیستم‌های همجوشی سبک به سنگین استفاده کرد. به‌طور کلی اغلب دیده می‌شود که  $R_B$  نشان دهنده تابعی از  $A_1^{1/3} + A_2^{1/3}$  است. با این حال تغییر  $R_B$  با  $A_1^{1/3} + A_2^{1/3}$  منظم نیست و رفتار سیستماتیکی بین

آن پیدا نمی‌کنیم.

در شکل ۱.۳  $R_B$  تابعی از جمع ریشه متوسط مربع شعاع پرتابه و هسته هدف است که با  $\langle r_1^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$  و  $\langle r_2^2 \rangle^{\frac{1}{2}}$  نمایش داده می‌شوند. شعاع rms به وسیله معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\langle r_{1(2)}^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{\int_0^\infty \rho_{1(2)}(r) r^4 dr}{\int_0^\infty \rho_{1(2)}(r) r^2 dr} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۶.۳)$$

توابع  $\rho_{1(2)}(r)$  به ترتیب نشان‌دهنده توزیع چگالی پرتابه و هسته هدف است. تابع چگالی هم به صورت زیر نوشته می‌شود

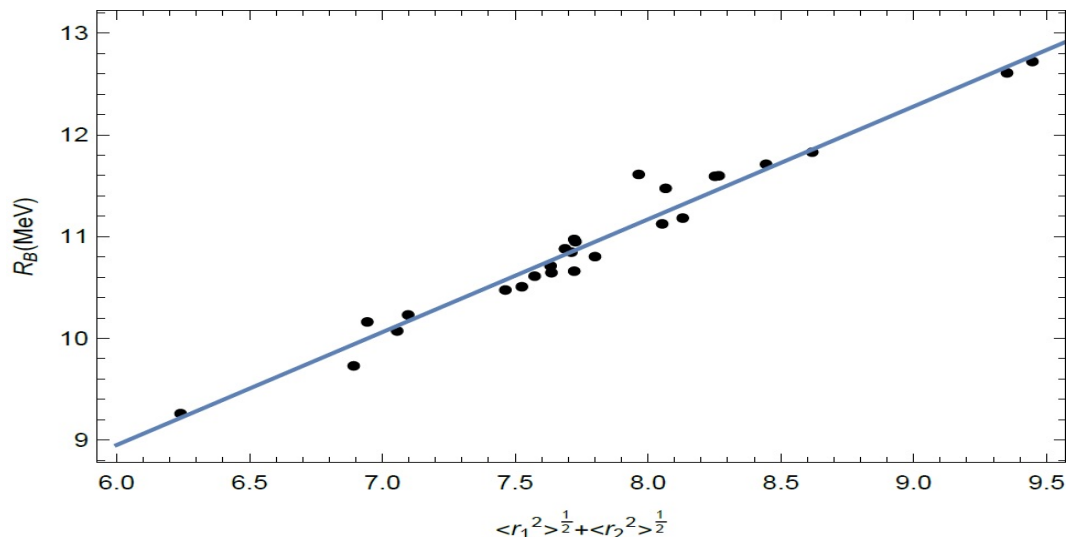
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left[ 1 + \exp\left(\frac{r-c}{a}\right) \right]} \quad (۷.۳)$$

$c$  شعاع نیم‌چگالی به صورت زیر است [۴۶].

$$c = r_\rho \left( 1 - \frac{\pi^2 a^2}{3 r_\rho^2} \right) \quad (۸.۳)$$

با  $r_\rho = 1/13 A_i^{\frac{1}{3}}$  و چگالی پراکندگی (پخش)  $a = 0.54 fm$  و  $A_i$  عدد جرمی هسته است. مقدار  $\rho_0$  با نرمال کردن به صورت زیر در می‌آید.

$$\int \rho(r) dr = A_i \quad (۹.۳)$$



شکل ۱.۳: موقعیت سد  $R_B$  بر حسب جمعی از ریشه متوسط مربع شعاع پرتابه و هسته هدف

از شکل ۱.۳ می‌بینیم که اکثر داده‌ها پراکنده نمی‌شوند و با افزایش جمع شعاع rms از پرتابه و هسته هدف یک افزایش خطی را حفظ می‌کنند بنابراین برای سیستم‌های همجوشی

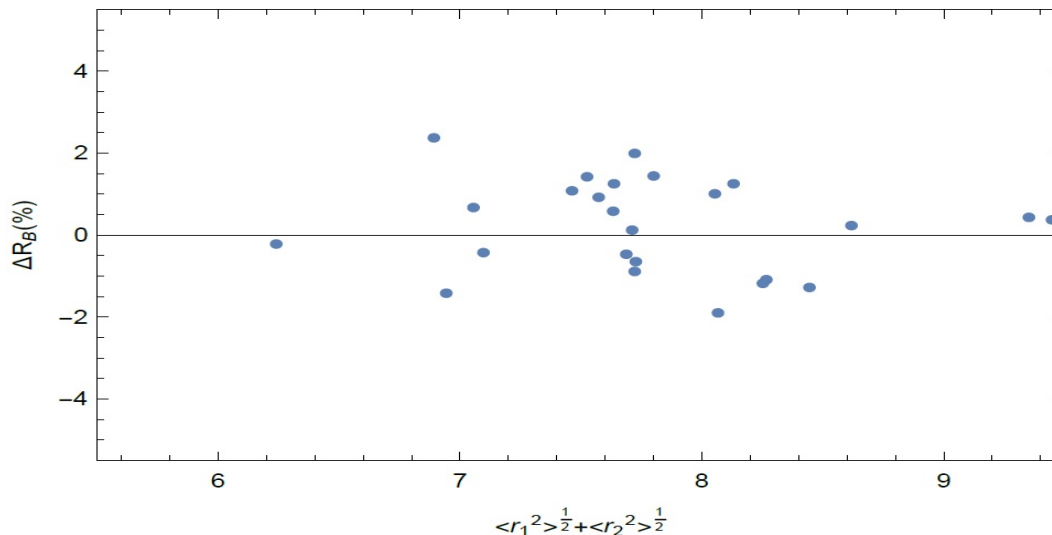
سنگین‌تر موقعیت سد به مقدار بزرگتری حرکت می‌کند و سهم پتانسیل کولنی بزرگتر از سهم پتانسیل هسته‌ای می‌شود. برای سیستم‌های همجوشی سبک پتانسیل کولنی ضعیف‌تر از پتانسیل هسته‌ای است و موقعیت سد به ناحیه داخلی که برابر با موقعیت سد کوچک است حرکت می‌کند. تابعی از خط مستقیم برای برازش داده‌ها که در شکل ۱.۳ استفاده شده را می‌بینیم. نقاط بخوبی با این خط مستقیم برازش شدند. براساس پارامترهای بدست آمده فرمول پارامتری شده نهایی برای موقعیت سد به صورت زیر است.

$$R_B^{par} = ۲/۳۸۶ + ۱/۰۹۹ \left( \langle r_1^2 \rangle^{\frac{1}{2}} + \langle r_2^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \right) \quad (۱۰.۳)$$

این معادله یک روش ساده و مستقیم برای محاسبه موقعیت سد برای تعداد زیادی از سیستم‌های همجوشی یون سنگین است فقط اگر شعاع rms از پرتابه و هسته هدف شناخته شده باشد می‌توان به آسانی موقعیت سد را بدست آورد. فرمول پارامتری شده بالا با تجزیه و تحلیل داده می‌شود که در صد انحراف به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\Delta R_B(\%) = \frac{R_B^{par} - R_B}{R_B} \times ۱۰۰ \quad (۱۱.۳)$$

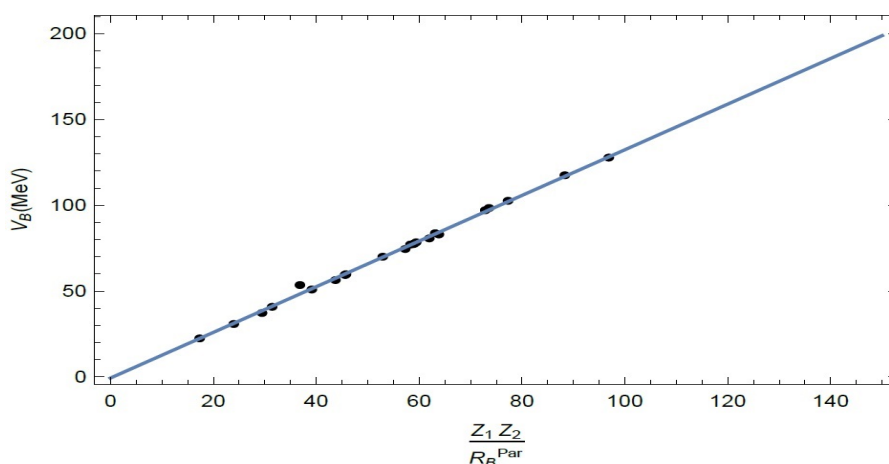
که  $R_B^{par}$  با معادله (۱۰.۳) محاسبه می‌شود و  $R_B$  هم از محاسبات پتانسیل تقریبی فعلی بدست می‌آید. نتایج در صد انحراف به صورت تابعی از  $\Delta R_B(\%)$  که در شکل ۲.۳ می‌بینیم.



شکل ۲.۳: تفاوت نسبی مکان سد بین نتایج محاسبه شده و نتایج برازش شده به صورت تابعی از مجموع ریشه متوسط مربع پرتابه و هسته هدف

دیده می‌شود که تقریباً درصد انحراف فرمول پارامتری شده در حدود  $\pm ۱\%$  است و نشان می‌دهد فرمول پارامتری شده به صورت جمع شعاع rms از پرتابه و هسته هدف بخوبی می‌تواند موقعیت سد را محاسبه کند. توزیع اصلی ارتفاع سد از پتانسیل کولنی که متناسب با  $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}}}$

است بخوبی شناخته شده است. در مطالعات مختلف [۴۷] اگرچه  $V_B$  را به صورت تابع توزیعی از  $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$  برای یک نوع سیستم همجوشی انتخاب می‌کنند، توزیع  $V_B$  در یک گستره کوچکی با  $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$  برای یک نوع سیستم همجوشی تغییر می‌کند و با این وجود رفتار سیستماتیکی برای هر سیستم همجوشی نشان نمی‌دهد. بنابراین اختصاص دادن یک فرمول ساده و مستقیم به صورت  $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$  ساده نیست. بسته به فرمول پارامتری بالا برای موقعیت سد، برای محاسبه ارتفاع سد برای تعدادی از سیستم‌های همجوشی از  $\frac{Z_1 Z_2}{R_B^{par}}$  استفاده شده که در شکل ۳.۳ به صورت نقاط داده‌ای می‌بینیم.



شکل ۳.۳:  $V_B$  برحسب تابعی از ارتفاع سد کولنی  $\frac{Z_1 Z_2}{R_B^{par}}$

دیده می‌شود که نقاط داده‌ای یک روند خطی خوب بین  $V_B$  و  $\frac{Z_1 Z_2}{R_B^{par}}$  را حفظ می‌کنند پس به طور مستقیم از تابعی متناسب با برازش داده‌ها استفاده می‌شود که به صورت معادله زیر است.

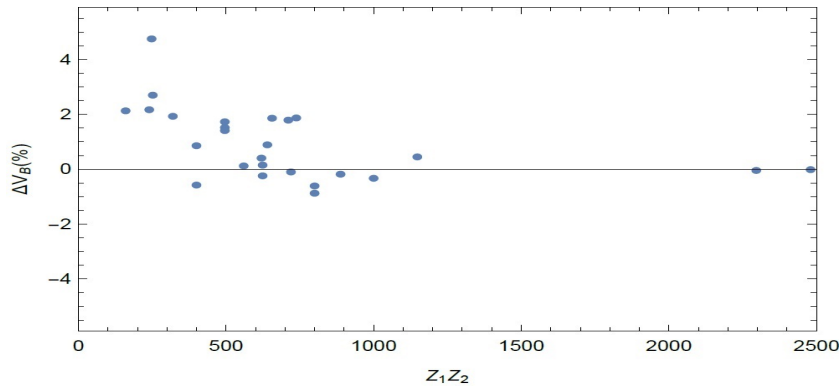
$$V_b = 1/327 \frac{Z_1 Z_2}{R_B^{par}} \quad (12.3)$$

این معادله روش ساده برای محاسبه ارتفاع سد است. برای بررسی درستی برازش معادله (۱۲.۳) درصد انحراف  $\Delta V_B(\%)$  به صورت تابعی از  $Z_1 Z_2$  در شکل ۴.۳ نشان داده شده است. تعریف  $\Delta V_B(\%)$  به صورت زیر است که  $V_B^{par}$  با معادله (۱۲.۳) و  $V_B$  با  $\frac{Z_1 Z_2}{R_B^{par}}$  محاسبه می‌شود.

$$\Delta V_B(\%) = \frac{V_B^{par} - V_B}{V_B} \times 100 \quad (13.3)$$

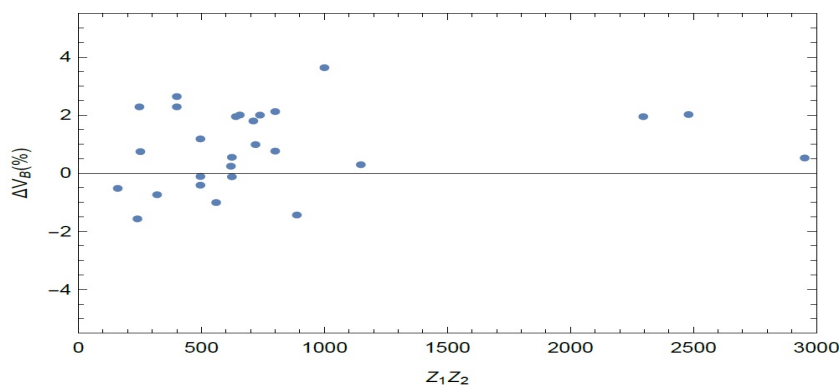
مشاهده می‌شود که جز برای ناحیه همجوشی خیلی سبک  $\Delta V_B$  های دیگر درصد انحراف حدود  $\pm 1\%$  را حفظ می‌کنند و برای سیستم‌های همجوشی سبک هم درصد انحراف در حدود  $\pm 2\%$  است. پس فرمول پارامتری شده بالا دقت زیادی برای محاسبه ارتفاع سد دارد. به





شکل ۴.۳: تفاوت نسبی ارتفاع‌های سد بین نتایج محاسبه شده و نتایج برازش شده برحسب تابعی از تعداد بار پرتابه و هسته هدف

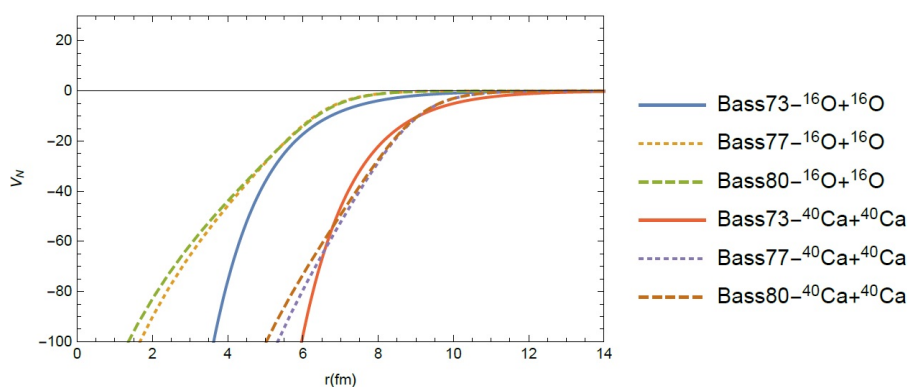
منظور بررسی معادله (۱۲.۳) که یک فرمول کلی برای هر سیستم همجوشی است در صد انحراف  $\Delta V_B(\%)$  بین مقادیر با معادله (۱۲.۳) و داده‌های تجربی برای تعدادی از سیستم‌های همجوشی یون سنگین که عددهای جرمی از سیستم‌های همجوشی سبک به سیستم‌های همجوشی سنگین است محاسبه شده و در شکل ۵.۳ نمایش داده می‌شود. مشاهده می‌شود که در اکثر موارد  $\Delta V_B$  کمتر از  $\pm 2\%$  است و به این معنی است که نتیجه محاسبات با معادله (۱۲.۳) و داده‌های تجربی قابل قبول است و می‌تواند مقدار دقیق ارتفاع سد را بدهد حتی در بعضی موارد برای داده‌های تجربی نیز ایده‌آل است بنابراین فرمول پارامتری شده بالا می‌تواند محاسبات ساده‌ای برای پارامترهای سد همجوشی انجام دهد.



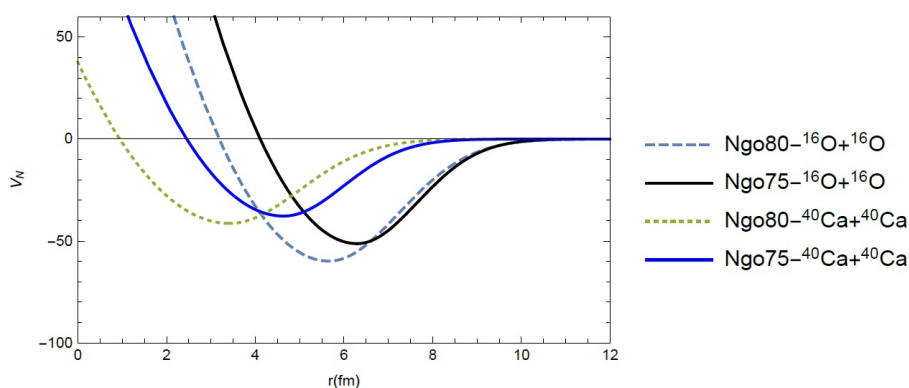
شکل ۵.۳: تفاوت نسبی بین ارتفاع‌های سد فرمول پارامتری شده و داده‌های تجربی برحسب تعداد بار پرتابه و هسته هدف

### ۳.۳ نتایج برخورد هسته‌های $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ ، $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$

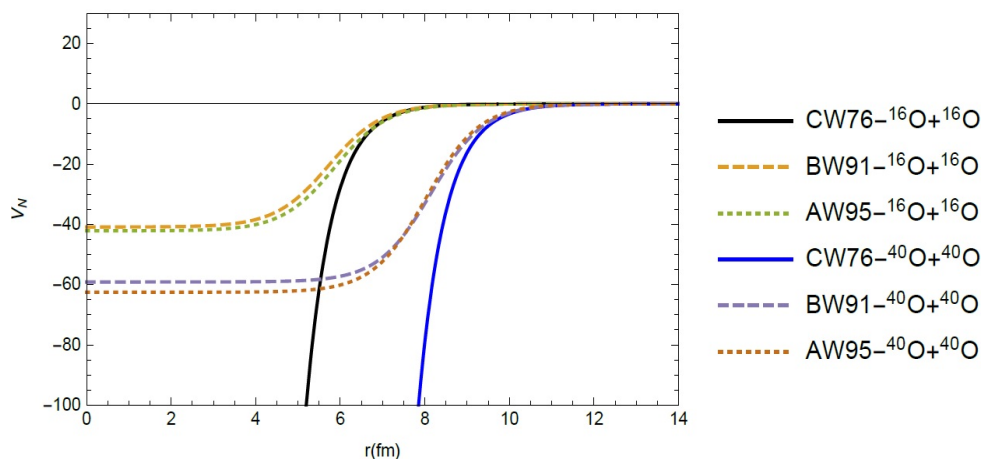
بخش هسته‌ای  $V_N(\text{MeV})$  از پتانسیل برهمکنش به صورت تابعی از فاصله بین هسته‌ای  $r$  با استفاده از برخی از نسخه‌های پیشین از پتانسیل تقریبی برای واکنش‌های  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  و  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  را نشان می‌دهیم. در شکل ۶.۳ سه نسخه از پتانسیل Bass را نمایش می‌دهیم و در شکل ۷.۳ با پارامترهای  $\text{In}^{\text{G}}\text{Ji}$  سروکار داریم پتانسیل‌های وینتر و همکارانش هم در شکل ۸.۳ نمایش داده شده است. در ادامه چهار نسخه از پتانسیل تقریبی Prox $\infty$ DP، Prox $\infty$ ، Prox $\infty$  و Prox $\infty$ DP در شکل ۹.۳ نشان داده می‌شود [۴۸].



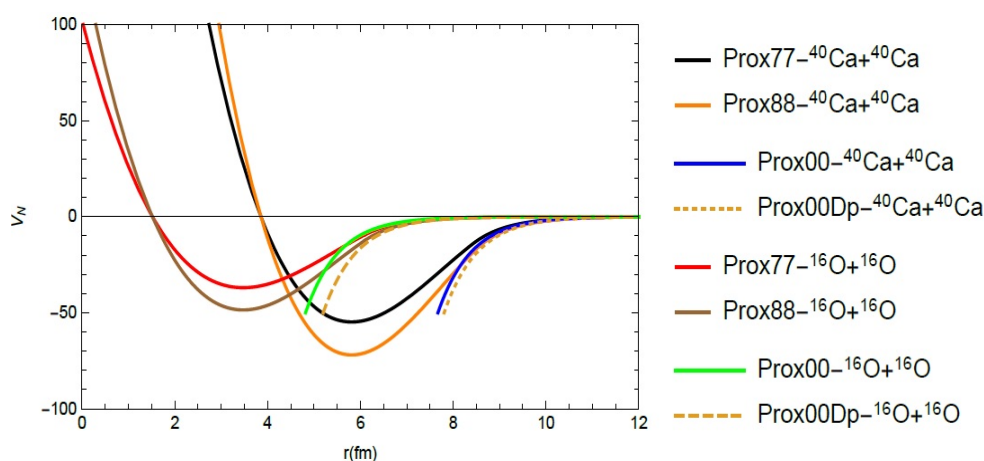
شکل ۶.۳: بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  برحسب تابع  $r$  برای پتانسیل‌های تقریبی Bass73، Bass77، Bass80



شکل ۷.۳: بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  برحسب تابع  $r$  برای پتانسیل‌های تقریبی Ngo75، Ngo80،



شکل ۸.۳: بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  بر حسب تابع  $r$  برای پتانسیل‌های تقریبی، CW76، BW91، AW95

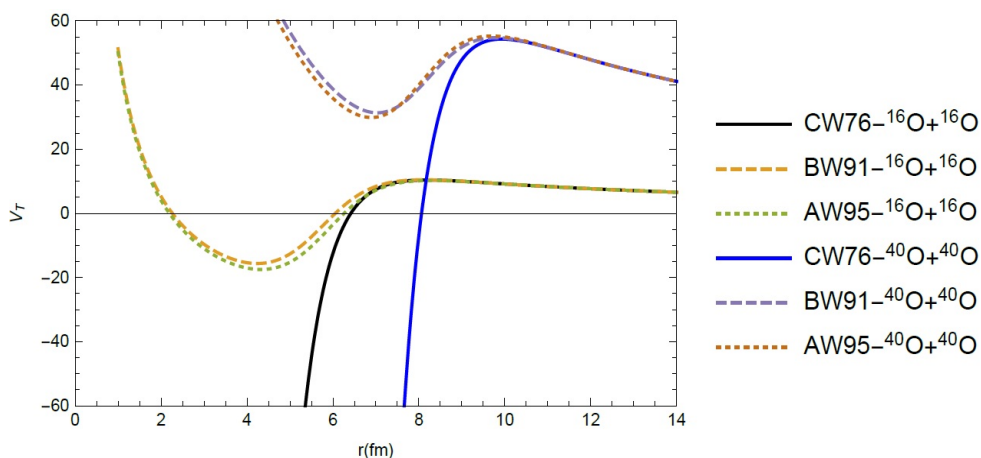


شکل ۹.۳: بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  بر حسب تابع  $r$  برای پتانسیل‌های تقریبی، Prox77، Prox88، Prox00، Prox00Dp

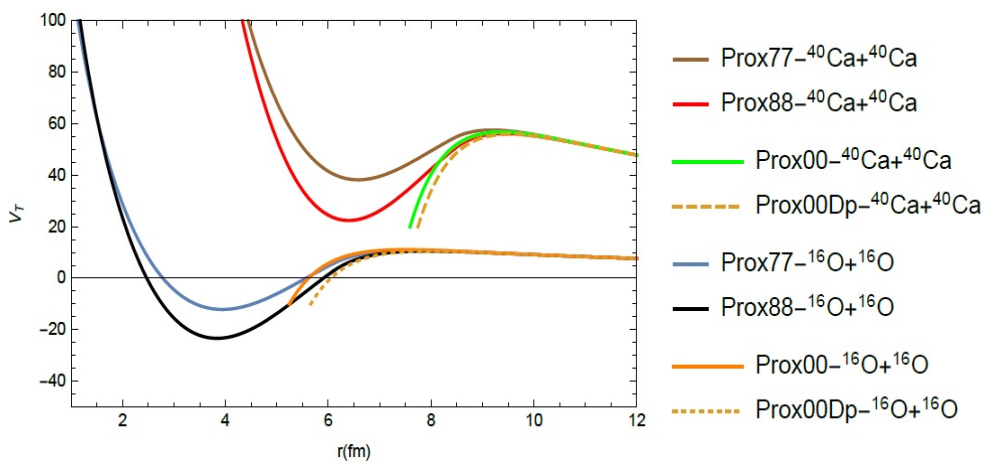
از شکل‌ها مشاهده می‌کنیم که نسخه‌های مختلف از پتانسیل‌های Bass و هم چنین  $CW76$  یک هسته دافع در مسافت‌های کوتاه‌تر ندارند. پتانسیل‌های  $BW91$  و  $AW95$  توزیع وود ساکسون‌گونه را دنبال می‌کنند. همه پتانسیل‌های دیگر شکل قابل قبولی دارند که در مسافت‌های طولانی جاذبه و در مسافت‌های کوتاه‌تر از دافعه پیروی می‌کنند. از آنجا که فرآیند همجوشی یک پدیده با چگالی کم در سطح بیرونی اتفاق می‌افتد تفاوت در قسمت داخلی می‌تواند خیلی مهم نباشد. با اضافه کردن پتانسیل کولنی به بخش هسته‌ای می‌توان پتانسیل کل را بدست آورد.

پتانسیل برهمکنش کل (هسته‌ای + کولنی)  $V_T(r)$  به‌عنوان تابعی از فاصله بین هسته‌ای  $r$  در شکل‌های ۱۰.۳ و ۱۱.۳ نمایش داده می‌شوند. نتایج را با استفاده از پتانسیل‌های تقریبی

مختلف نمایش می‌دهیم که به لحاظ ارتفاع‌های سد همجوشی و موقعیت‌ها همه نسخه‌ها ارتفاع‌های سد و موقعیت‌های مشابه نزدیک به هم را حاصل می‌شوند.

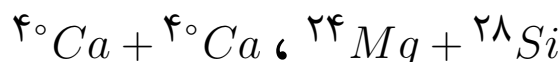


شکل ۱۰.۳: پتانسیل برهمکنش کل  $V_T(r)$  (هسته‌ای + کولنی) بر حسب تابع  $r$  برای پتانسیل‌های تقریبی CW76 ، BW91 ، AW95



شکل ۱۱.۳: پتانسیل برهمکنش کل  $V_T(r)$  (هسته‌ای + کولنی) بر حسب تابع  $r$  برای پتانسیل‌های تقریبی Prox77 , Prox88 , Prox00 , Prox00Dp

## ۴.۳ بررسی سطح مقطع‌های همجوشی برای واکنش‌های



با داشتن موقعیت و ارتفاع سد پتانسیل می‌توان سطح مقطع عبوری همجوشی در سطح میکروسکوپیک را محاسبه کرد. به منظور بررسی سطح مقطع‌های عبوری همجوشی از مدل داده شده توسط وانگ استفاده می‌شود. مدل داده شده توسط وانگ برای شرح واکنش‌های همجوشی در انرژی‌هایی که خیلی بالاتر از سد و در انرژی‌های خیلی بالا نیستند استفاده می‌شود که به وضوح نتایج تجربی را به درستی توضیح می‌دهد. در این فرمالیسم سطح مقطع به صورت زیر است [۴۹، ۵۰].

$$\sigma_{fus} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{l_{\max}} (2l+1) T_l(E_{cm}) \quad (14.3)$$

که  $k = \sqrt{2\mu E_{cm}}/\hbar$  و  $\mu$  جرم کاهشدهنده است. انرژی مرکز جرم با  $E_{cm}$  نشان داده شده است. در این فرمول  $l_{\max}$  مربوط به بزرگترین موج جزئی برای پتانسیل برهمکنشی که هنوز هم وجود دارد و  $T_l(E_{cm})$  انرژی بستگی عامل نفوذ سد و به صورت زیر تعریف شده است.

$$T_l(E_{cm}) = \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2\pi}{\hbar\omega_l} (V_B^{theor} - E_{cm}) \right] \right\}^{-1} \quad (15.3)$$

که  $\hbar\omega_l$  معکوس شده انحنای سهمی است. اگر فرض شود که موقعیت سد و پهنای سد مستقل از  $l$  باشند سطح مقطع عبوری همجوشی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\sigma_{fus}(mb) = \frac{10 R_B^{theor} \hbar\omega_0}{2 E_{cm}} \times \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2\pi}{\hbar\omega_0} (E_{cm} - V_B^{theor}) \right] \right\} \quad (16.3)$$

برای  $E_{cm} \gg V_B^{theor}$  فرمول قبلی به فرمول زیر کاهش یافته است.

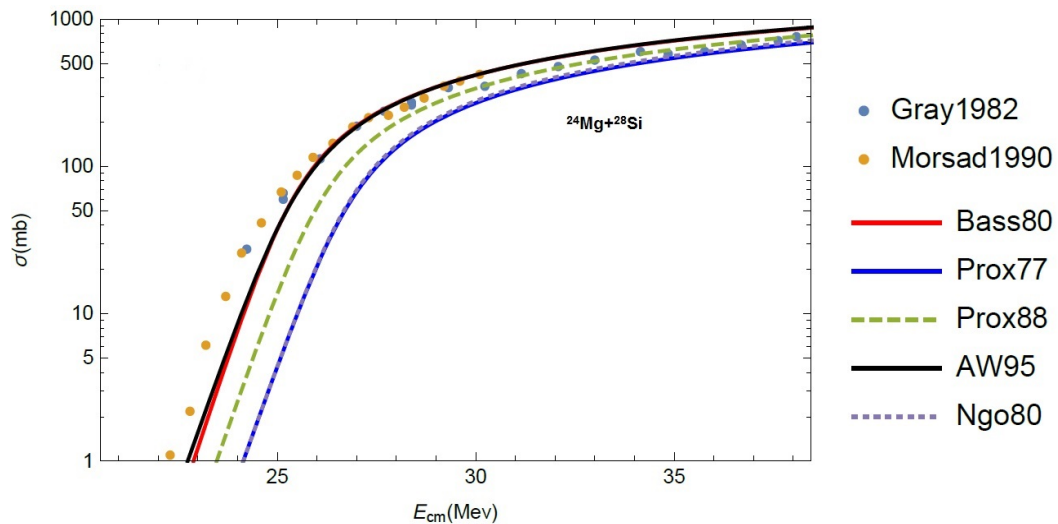
$$\sigma_{fus}(mb) = 10\pi R_B^{theor} \left( 1 - \frac{V_B^{theor}}{E_{cm}} \right) \quad (17.3)$$

در حالی که برای  $E_{cm} \ll V_B^{theor}$  فرمول فوق به صورت زیر در می‌آید.

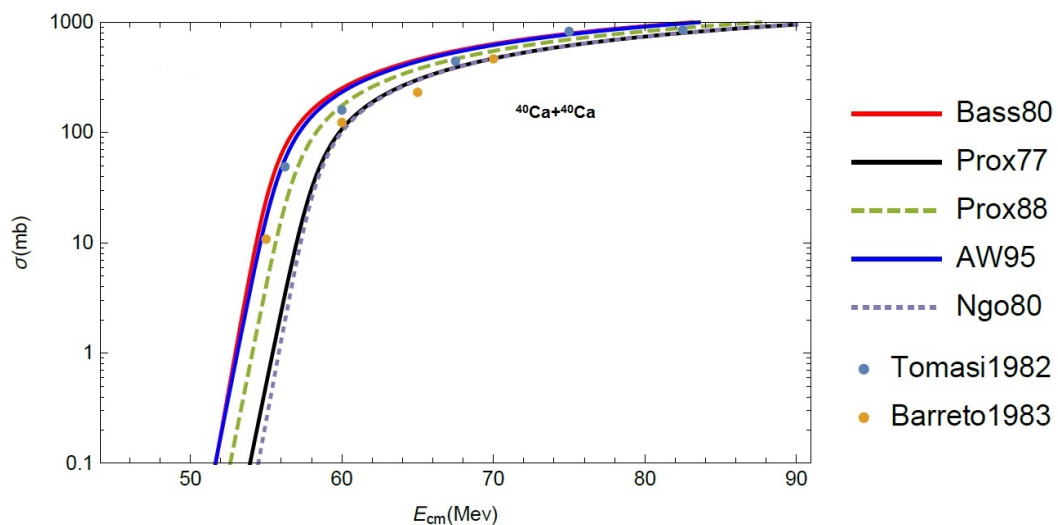
$$\sigma_{fus}(mb) = \frac{10 R_B^{theor} \hbar\omega_l}{2 E_{cm}} \exp \left\{ \frac{2\pi}{\hbar\omega_0} (E_{cm} - V_B^{theor}) \right\} \quad (18.3)$$

که معادله (۱۶.۳) برای محاسبه سطح مقطع‌های همجوشی استفاده شده است. در شکل‌های زیر سطح مقطع‌های عبوری همجوشی برحسب میلی بارن به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم  $E_{cm}$  برای واکنش‌های  ${}^{24}\text{Mg} + {}^{28}\text{Si}$  در شکل ۱۲.۳ و  ${}^4\text{Ca} + {}^4\text{Ca}$  در شکل ۱۳.۳ نمایش داده می‌شود. داده‌های تجربی از مراجع [۵۱-۵۴] گرفته شده‌اند.

۳۱ بررسی سطح مقطع‌های همجوشی برای واکنش‌های  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ ،  $^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$



شکل ۱۲.۳: سطح مقطع‌های عبوری همجوشی  $\sigma(mb)$  برحسب انرژی مرکز جرم  $E_{cm}$  برای  $^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$



شکل ۱۳.۳: سطح مقطع‌های عبوری همجوشی  $\sigma(mb)$  برحسب انرژی مرکز جرم  $E_{cm}$  برای  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$

دیده می‌شود Bass<sup>۸۰</sup> و AW<sup>۹۵</sup> نتیجه بهتری برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$  می‌دهد، در حالی که Prox<sup>۷۷</sup> و Ngo<sup>۸۰</sup> نزدیک داده‌های تجربی شکست می‌خورند. در هر دو مورد AW<sup>۹۵</sup> قادر است سطح مقطع‌های همجوشی را بازتولید کند.

## ۵.۳ پتانسیل تقریبی ProxNew

بخش هسته‌ای از پتانسیل برهمکنش  $V_N(r)$  مطابق با چهارچوب پتانسیل تقریبی ۱۹۷۷ به صورت معادله زیر است [۱۳].

$$V_N^{\text{ProxNY}}(r) = 4\pi\gamma b\bar{R}\phi\left(r - C_1 - C_2/b\right) \text{ MeV} \quad (19.3)$$

که  $\bar{R}$  شعاع کاهیده و به شکل زیر است.

$$\bar{R} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (20.3)$$

$C_i$  نشان دهنده شعاع ماده است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$C_i = c_i + \frac{N_i}{t_i} \quad i = 1, 2 \quad (21.3)$$

که  $c_i$  شعاع نیم‌چگالی از توزیع بار و  $t_i$  پوسته نوترونی از هسته است برای محاسبه  $c_i$  از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۶].

$$c_i = R_{\infty i} \left( 1 - \frac{7}{2} \frac{b^2}{R_{\infty i}^2} - \frac{49}{8} \frac{b^4}{R_{\infty i}^4} + \dots \right) \quad i = 1, 2 \quad (22.3)$$

و  $R_{\infty i}$  شعاع بار هسته‌ای که به صورت زیر است

$$R_{\infty i}^{\text{fit}} = 1/171 A_i^{1/3} + 1/427 A_i^{-1/3} \quad i = 1, 2 \quad (23.3)$$

این شکل از شعاع هسته‌ای شبیه به باس و وینتر [۳۷، ۳۸] است که با استفاده از مقدار rms اندازه‌گیری شده از توزیع بار  $\langle r^2 \rangle < r^2 \rangle$  داده شده در مرجع [۵۵] بدست آمده و با  $R_{\infty i}^{\text{fit}}$  نامگذاری شده است. پوسته نوترونی  $t_i$  در معادله (۲۱.۳) با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$t_i = \frac{3}{2} r_0 \left[ \frac{J I_i - \frac{1}{12} c_1 Z_i A_i^{-1/3}}{Q + \frac{9}{4} J A_i^{-1/3}} \right] \quad i = 1, 2 \quad (24.3)$$

$r_0 = 1/14 \text{ fm}$  و ضریب انرژی متقارن هسته‌ای  $J = 32/65 \text{ MeV}$  و  $c_1 = \frac{3e^2}{8r_0} = 0.757895 \text{ MeV}$  است. ضریب سختی پوست نوترونی  $Q$  هم  $35/4 \text{ MeV}$  که این ضرایب از مرجع [۱۶] گرفته شدند. ضریب انرژی سطحی برگرفته از مایرز و سویتکی [۴۴] و به شکل زیر است.

$$\gamma = \gamma_0 \left[ 1 - k_s \left( \frac{N - Z}{A} \right)^2 \right] \quad (25.3)$$

که  $A, Z, N$  مربوط به نوترون و پروتون و جرم کل دو هسته برخوردکننده است. در معادله (۲۵.۳)  $\gamma_0$  ضریب انرژی سطحی و  $k_s$  ثابت نامتقارن سطح است که هر دو ثوابت از اول توسط مایرز و سویتکی با برازش انرژی‌های بستگی تجربی پارامتری شده بودند. [۴۴] اولین مجموعه

از این ثوابت برای  $\gamma_0, k_s$  به ترتیب  $1/79$  و  $1/0.1734 \text{ MeV}/\text{fm}^2$  گرفته شده است. در نسخه تقریب اصلی  $\gamma_0, k_s$  به ترتیب  $1/7826$  و  $0.9517 \text{ MeV}/\text{fm}^2$  است [۵۶] بعدا این مقادیر با توجه به پیشرفت در تئوری و تجربه تجدیدنظر شدند. چهار تا از ضرایب مشخص شده و در جدول ۳.۳ لیست شده است.

در مطالعه اخیر خود را به آخرین مجموعه از مقادیر  $k_s = 2.345 \text{ MeV}/\text{fm}^2, \gamma_0 = 1/25284 \text{ MeV}/\text{fm}^2$  محدود می‌کنیم. تابع کلی  $\phi\left(\frac{r-C_1-C_2}{b}\right)$  در معادله (۱۹.۳) توسط نویسندگان مختلف به شکل‌های مختلفی در نظر گرفته شده‌اند. که در مطالعه اخیر شکل اصلاح شده از بلوکی و سویتکی [۱۴] به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\phi(\xi) = \begin{cases} -1/7817 + 0.9270\xi + 0.143\xi^2 - 0.09\xi^3, & \xi \leq 0 \\ -1/7817 + 0.9270\xi + 0.01696\xi^2 - 0.05148\xi^3, & 0 \leq \xi \leq 1/9475, \quad (26.3) \\ -4/41 \exp\left(-\frac{\xi}{0.7176}\right), & \xi \geq 1/9475 \end{cases}$$

که  $\xi = \left(\frac{r-C_1-C_2}{b}\right)$  است  $b$  عرض سطح که نزدیک واحد ارزیابی شده است. با استفاده این پارامترها یک پتانسیل تقریبی جدید ایجاد خواهد شد. که این پتانسیل با ProxNew نامگذاری شده [۵۷] و همراه با این شکل جدید، پتانسیل تقریبی اولیه [۱۳] و شکل اصلاح شده [۱۶] برای مقایسه نتایج استفاده می‌شود. که به ترتیب ProxOld و ProxMod نامیده می‌شوند. برهمکنش پتانسیل کل یون-یون  $V_T(r)$  بین هسته‌های برخوردکننده با بارهای  $Z_1, Z_2$  مرکز

جدول ۳.۳: ضرایب مختلف انرژی سطح موجود مطابق با مقادیرهایی که دارند

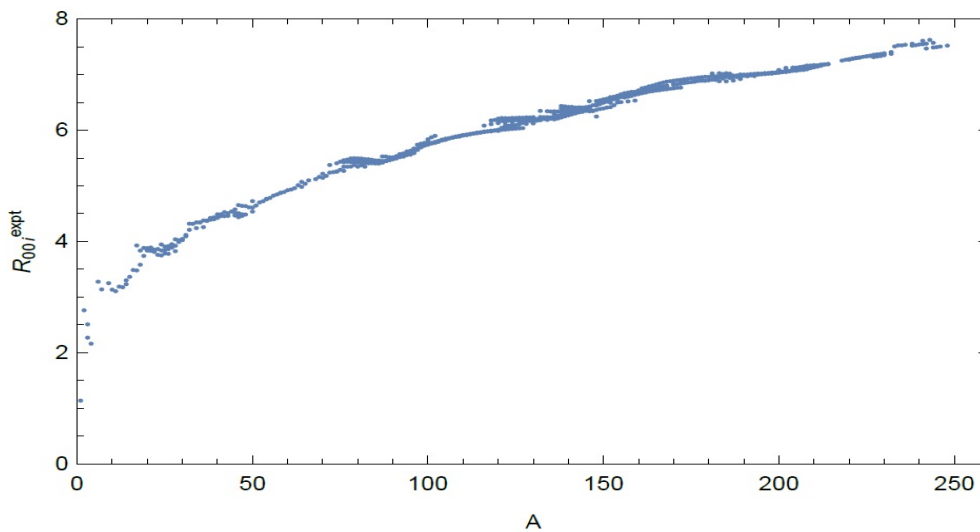
$a_2(\text{MeV})$	$r_0(\text{fm})$	$\gamma_0(\text{MeV fm}^{-2})$	$K_s$	مرجع
18/56	1/2049	1/0.1734	1/79	[۴۴]
17/9439	1/2249	0.9517	1/7826	[۵۶]
24/7	1/16	1/460734	4/0	[۵۸]
21/7	1/18	1/2402	3/0	[۵۹]
20/57	1/18	1/1756	2/2	[۳۰]
21/53	1/16	1/27326	2/5	[۳۰]
21/14	1/16	1/2502	2/4	[۳۰]
21/13	1/16	1/2496	2/3	[۳۰]
17/9439	1/2249	0.9517	2/6	[۶۰]
21/18466	1/16	1/25284	2.345	[۶۱]
19.3859	1/18995	1/0.8948	1/9830	[۶۲]
17/0603	1/21610	0.9180	0.7546	[۶۲]
16/9707	1/21725	0.911445	2/2938	[۶۲]



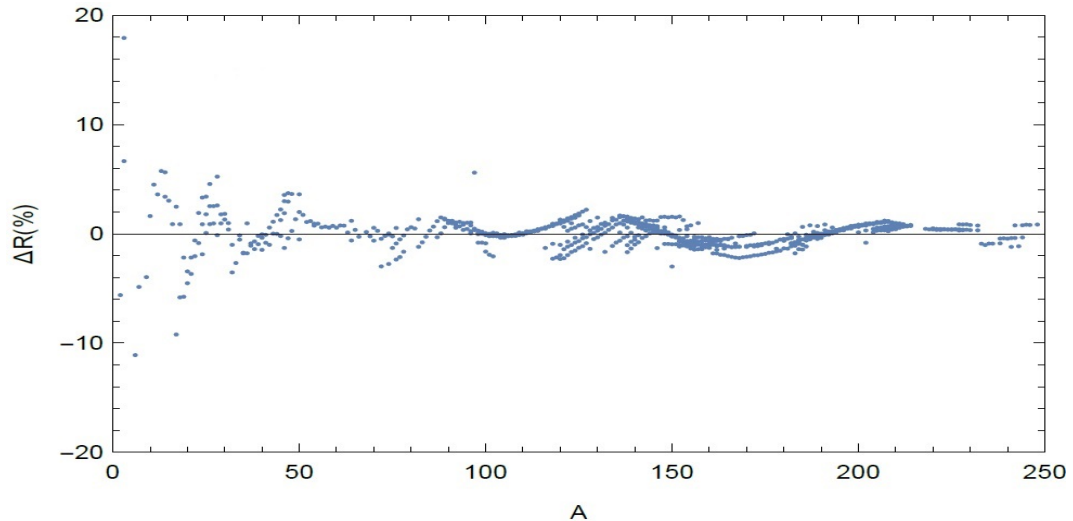
جدایی  $r$  و توزیع چگالی فرضی کروی به صورت معادله (۱.۳) است. سه عاملی که بر نتیجه پتانسیل تقریبی حکمفرماست (۱) ضریب انرژی سطح (۲) تابع کلی (۳) شعاع هسته‌ای

آخرین اطلاعات روی این سه عامل می‌تواند پتانسیل تقریبی اولیه را تغییر دهد. برای شعاع هسته‌ای جدید فرمول (۲۳.۳) از اندازه‌گیری مقدار rms از توزیع بار [۵۵] با استفاده از روش حداقل مربعات، برازش شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتایج در شکل ۱۴.۳ نشان داده شدند که این شکل به خوبی در مراجع [۳۷، ۳۸] شناخته شده است و درستی این فرمول برازش شده با شکل ۱۵.۳ چک می‌شود که درصد اختلاف بین مقادیر برازش شده و داده‌های تجربی به صورت زیر تعریف می‌شود که به عنوان یک تابعی از جرم کل نمایش داده می‌شود.

$$\Delta R(\%) = \frac{R^{fit} - R^{expt}}{R^{expt}} \times 100 \quad (27.3)$$



شکل ۱۴.۳: تغییرات معادل شعاع هسته‌ای rms،  $R_{00,i}^{expt}(fm)$  بر حسب تابعی از جرم کل هسته  $A$

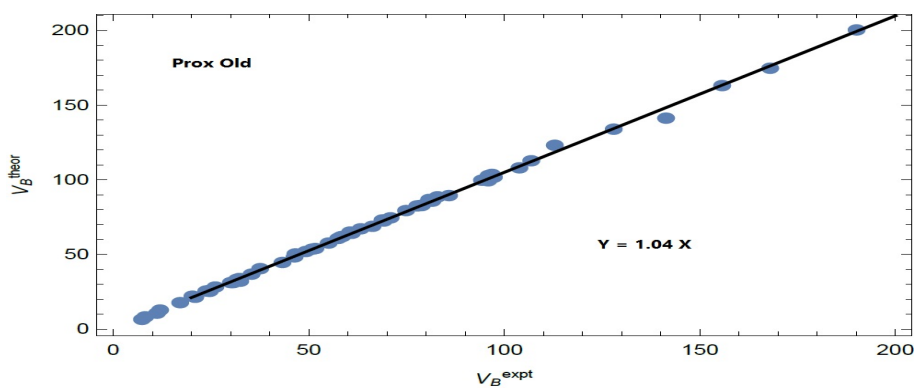


شکل ۱۵.۳: درصد انحراف  $\Delta R_B(\%)$  برحسب تابعی از جرم کل A

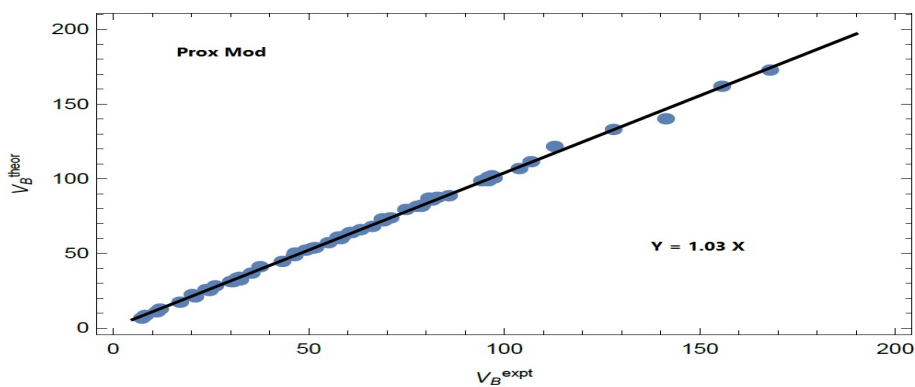
فرمول شعاعی برازش شده معادله (۲۳.۳) داده‌های تجربی را با متوسط حدود  $\pm 5\%$  بازتولید می‌کند. پراکندگی اندک برای ناحیه سبک‌تر مشاهده می‌شود درحالی‌که برای ناحیه سنگین توافق درستی وجود دارد. در آنالیز فعلی هم از فرمول شعاعی جدید استفاده می‌شود و شکل جدیدی از پتانسیل تقریبی با استفاده مجموعه‌ای از پارامترها ساخته می‌شود. با استفاده از این نسخه جدید و نسخه قدیمی و اصلاح شده پتانسیل تقریبی، ارتفاع و موقعیت سد با معادله (۵.۳) محاسبه می‌شود.

در شکل‌های ۱۶.۳، ۱۷.۳ و ۱۸.۳ ارتفاع‌های سد همجوشی تئوری  $V_B^{theor}$  با استفاده از نسخه‌های مختلف پتانسیل تقریبی نمایش داده می‌شوند. مقادیر تجربی از مراجع [۱۰] گرفته شدند.

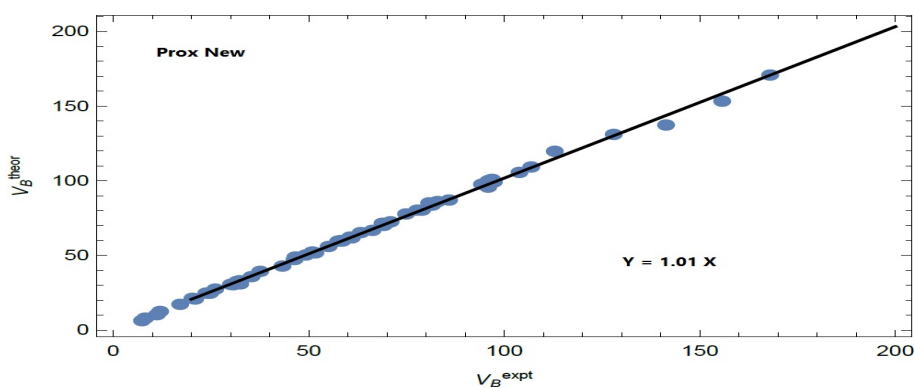
تقریب جدید ارتفاع‌های سد همجوشی را در حدود ۱٪ باز تولید می‌کند در حالی‌که نسخه قدیمی و اصلاح شده مشابه ارتفاع‌های سد همجوشی را به ترتیب در حدود ۴٪ و ۳٪ بازتولید می‌کنند.



شکل ۱۶.۳: مقایسه‌ای از ارتفاع‌های تئوری سد همجوشی  $V_B^{theor}(MeV)$  محاسبه شده با نسخه قدیمی مطابق با مقادیر تجربی  $V_B^{expt}(MeV)$

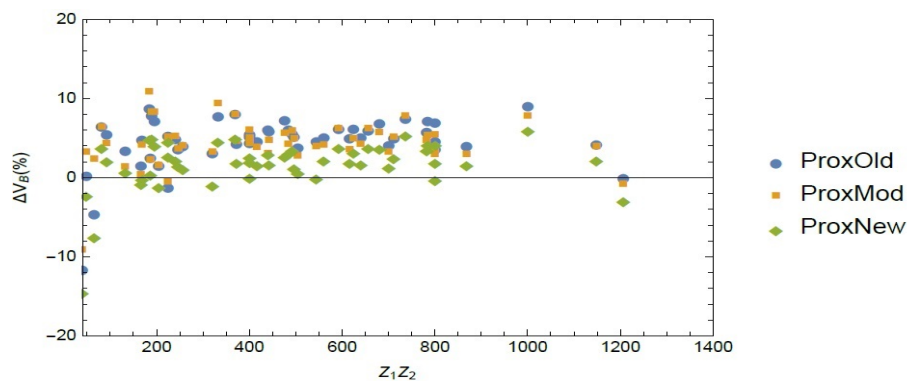


شکل ۱۷.۳: مقایسه‌ای از ارتفاع‌های تئوری سد همجوشی  $V_B^{theor}(MeV)$  محاسبه شده با نسخه اصلاح‌شده مطابق با مقادیر تجربی  $V_B^{expt}(MeV)$

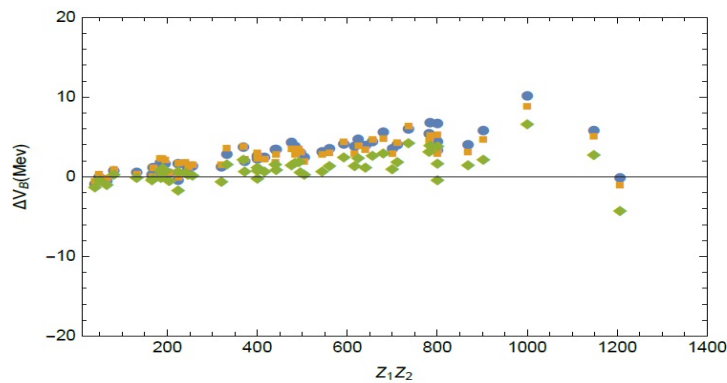


شکل ۱۸.۳: مقایسه‌ای از ارتفاع‌های تئوری سد همجوشی  $V_B^{theor}(MeV)$  محاسبه شده با نسخه جدید مطابق با مقادیر تجربی  $V_B^{expt}(MeV)$

دیده می‌شود که پتانسیل تقریبی اصلی و اصلاح‌شده به اندازه کافی برای توضیح داده‌ها خوب نیستند این ممکن است به دلیل استفاده نادرست از مقادیر شعاع، ضریب انرژی سطح و تابع کلی باشد. در شکل ۱۹.۳ درصد انحراف بین مقادیر ارتفاع سد تجربی و ارتفاع‌های سد همجوشی تئوری با استفاده از پتانسیل تقریبی مختلف نمایش داده می‌شود. ارتفاع‌های سد همجوشی به طور متوسط در حدود  $\pm 5\%$  بازتولید می‌شود و در شکل ۲۰.۳ تفاوت بین ارتفاع‌های سد همجوشی تئوری و تجربی استخراج شده و نمایش داده می‌شود. از شکل‌ها به وضوح دیده می‌شود که ProxNew به نتایج نزدیکتر است و قادر به بازتولید داده‌های تجربی از کم‌ترین به سنگین‌ترین ناحیه جرمی است.

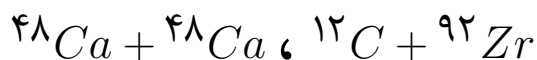


شکل ۱۹.۳: درصد انحراف  $\Delta V_B(\%)$  برحسب تابعی از  $Z_1 Z_2$  با استفاده از نسخه‌های مختلف پتانسیل تقریبی

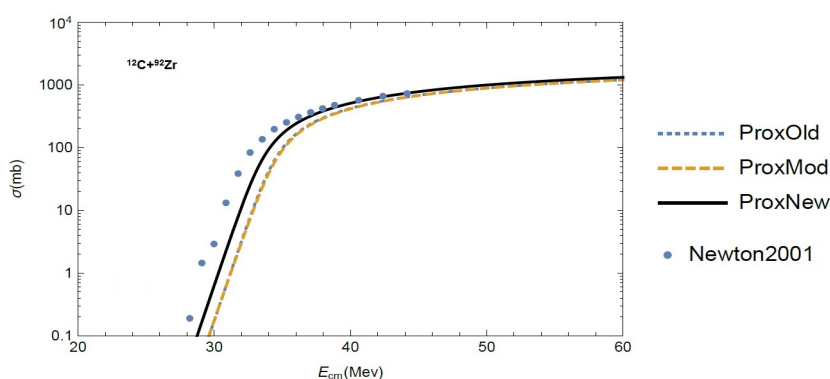


شکل ۲۰.۳: تغییرات  $\Delta V_B(\text{MeV})$  برحسب تابعی از  $Z_1 Z_2$  با استفاده از نسخه‌های مختلف پتانسیل تقریبی

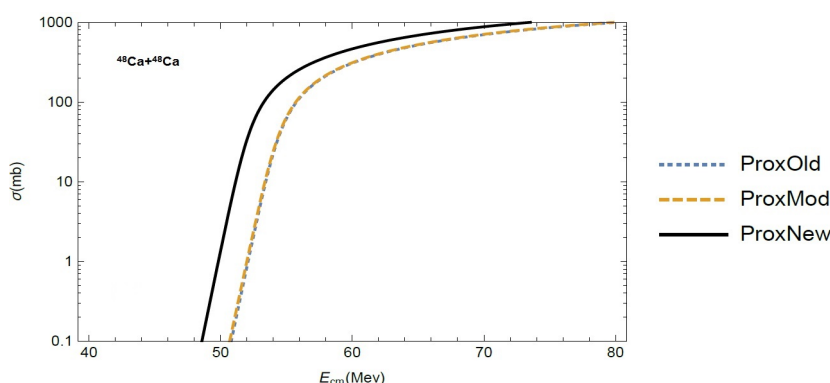
## ۶.۳ بررسی سطح مقطع‌های همجوشی برای واکنش‌های



دقت پتانسیل تقریبی بر احتمال همجوشی بررسی شده است در شکل ۲۱.۳ و ۲۲.۳ نمودار سطح مقطع‌های همجوشی  $\sigma_{fus}$  برحسب میلی بارن به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم  $E_{cm}$  برای واکنش‌های  ${}^{12}\text{C} + {}^{92}\text{Zr}$  [۶۳] و  ${}^{48}\text{Ca} + {}^{48}\text{Ca}$  [۶۴] نمایش داده شده‌اند. سطح مقطع‌های همجوشی با استفاده از مدل شناخته شده وانگ محاسبه می‌شوند [۴۹، ۵۰]. سطح مقطع برای نسخه‌های پیشین یعنی ProxOld و ProxMod به همراه شکل جدید پتانسیل تقریبی ProxNew نمایش داده شده و از شکل ProxNew به وضوح دیده می‌شود که توافق خوبی بین آن و داده‌های تجربی وجود دارد در حالی که فرم‌های قدیمی‌تر از داده‌های تجربی دور هستند.



شکل ۲۱.۳: سطح مقطع‌های عبوری همجوشی  $\sigma_{fus}(mb)$  برحسب تابعی از  $E_{cm}$  با استفاده از نسخه‌های مختلف پتانسیل تقریبی برای واکنش  ${}^{12}\text{C} + {}^{92}\text{Zr}$



شکل ۲۲.۳: سطح مقطع‌های عبوری همجوشی  $\sigma_{fus}(mb)$  برحسب تابعی از  $E_{cm}$  با استفاده از نسخه‌های مختلف پتانسیل تقریبی برای واکنش  ${}^{48}\text{Ca} + {}^{48}\text{Ca}$

# فصل ۴

## پتانسیل‌های تقریبی اصلاح‌شده

### ۱.۴ تابع کلی جدید به صورت پتانسیل یوکاواگونه

پتانسیل برهمکنش کل  $V_T(r)$  به صورت رابطه زیر است.

$$V_T(r) = V_N(r) + V_C(r) = V_N(r) + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (1.4)$$

بخش هسته‌ای پتانسیل برهمکنش  $V_N(r)$  مطابق با چهارچوب پتانسیل تقریبی اصلی به صورت معادله زیر است.

$$V_N^{\text{Pr ox}}(r) = 4\pi\gamma b\bar{R}\phi\left(r - C_1 - C_2/b\right) \text{ MeV} \quad (2.4)$$

تابع کلی در آن را به صورت رابطه زیر اصلاح می‌کنیم که در آن بجای تابع نمایی در رابطه (۲.۴) از پتانسیلی به شکل پتانسیل یوکاواگونه استفاده می‌کنیم.

$$\phi(\xi) = \begin{cases} -1.7817 + 0.9270\xi + 0.143\xi^2 - 0.09\xi^3, & \xi \leq 0 \\ -1.7817 + 0.9270\xi + 0.01696\xi^2 - 0.05148\xi^3, & 0 \leq \xi \leq 1/9475 \\ \frac{\alpha_1}{\alpha_2\xi + C_1 + C_2} \exp(-\alpha_0\xi), & \xi \geq 1/9475 \end{cases} \quad (3.4)$$

که  $\alpha_0$ ،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  مجهولات ما هستند و  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  از شرط پیوستگی دو معادله در نقطه  $\xi = 1/9475$  بدست می‌آید و  $\alpha_0$  پارامتر آزاد مسأله است که همزمان که شرط پیوستگی دو معادله اعمال

می‌شود از مقایسه با داده‌های تجربی بدست می‌آید.

$$\phi(1/9475) = \phi(1/9475) \quad (4.4)$$

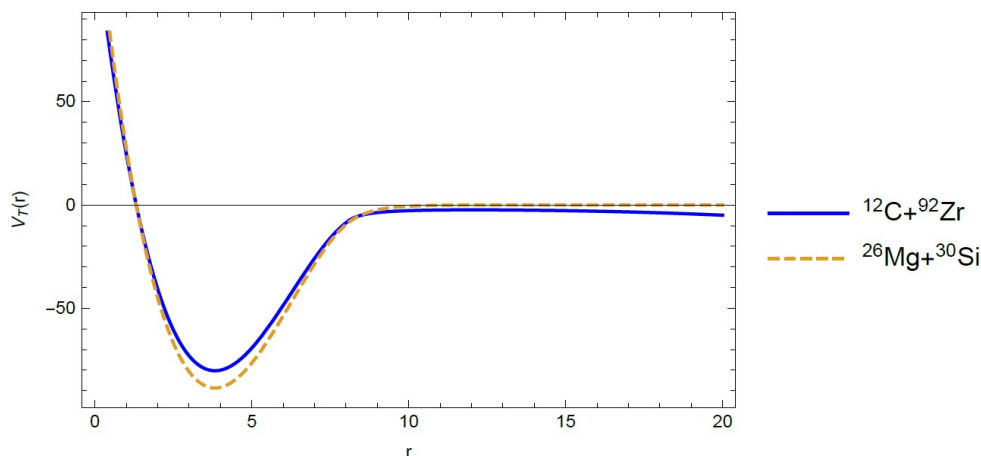
$$\phi'(1/9475) = \phi'(1/9475) \quad (5.4)$$

با استفاده این پارامترها یک پتانسیل جدید به وجود می‌آید که به شکل پتانسیل یوکاواگونه است از این پتانسیل جدید و پتانسیل‌های ProxOld [۱۳] ProxMod [۱۴] و ProxNew [۵۷] برای مقایسه نتایج استفاده خواهد شد. در واقع برای مدل اصلاح‌شده پتانسیل تقریبی برای بازتولید داده‌های تجربی و همچنین صحت این مدل جدید از حل عددی استفاده می‌کنیم. پیش بینی‌های تئوری با برازش پارامترها روی داده‌های تجربی با استفاده از روش حداقل مربعات (rms) ارزیابی می‌شود.

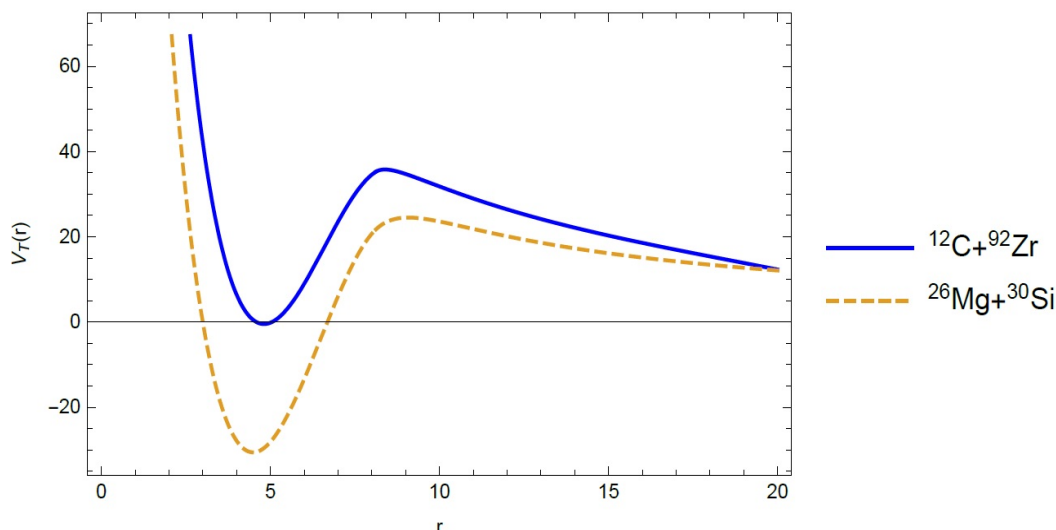
$$\chi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i^{exp} - \sigma_i^{theo})^2}{N}} \quad (6.4)$$

که سطح مقطع تجربی با  $\sigma^{exp}$  و پیش بینی‌های تئوری با  $\sigma^{theo}$  نشان داده می‌شوند و  $N$  هم تعداد سطح مقطع‌های تجربی است. در روش برازش پارامتر آزاد بگونه‌ای بدست می‌آید که انحراف  $\chi$  از داده‌های تجربی مینیمم شود.

در شکل ۱.۴ بخش هسته‌ای از پتانسیل برهمکنش  $V_N(r)$  بر حسب تابعی از  $r$  و در شکل ۲.۴ پتانسیل برهمکنش کل  $V_T(r)$  بر حسب تابعی از  $r$  با استفاده از فرم پتانسیل یوکاواگونه برای واکنش‌های همجوشی  $^{12}C + ^{92}Zr$  و  $^{26}Mg + ^{30}Si$  را نمایش می‌دهیم.

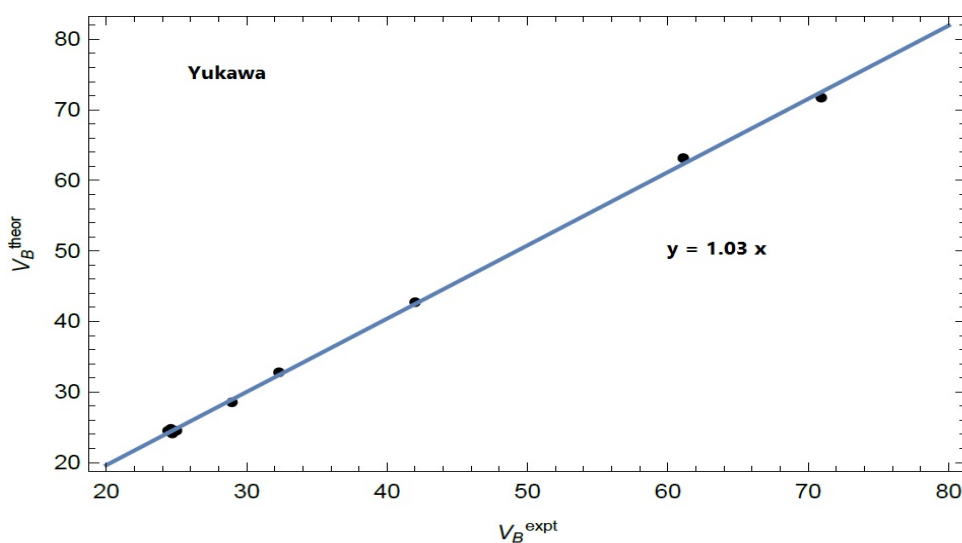


شکل ۱.۴: بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  برای واکنش‌های  $^{12}C + ^{92}Zr$  و  $^{26}Mg + ^{30}Si$



شکل ۲.۴: برهمکنش کل برای واکنش‌های  $^{12}\text{C} + ^{92}\text{Zr}$  و  $^{26}\text{Mg} + ^{30}\text{Si}$

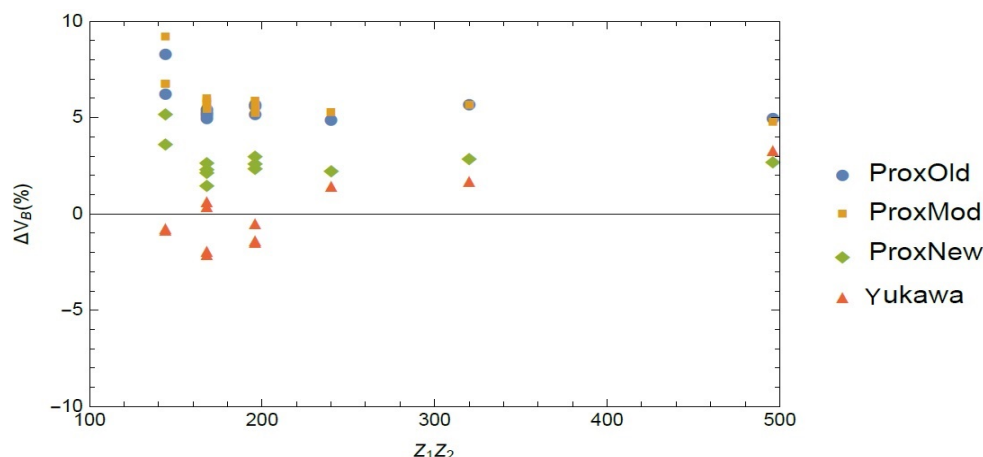
با استفاده از پتانسیل یوکاواگونه ارتفاع سد کولنی و موقعیت سد با استفاده از رابطه (۵.۳) بدست می‌آید. در شکل ۳.۴ ارتفاع‌های تئوری سد همجوشی با استفاده از پتانسیل یوکاواگونه محاسبه می‌شوند که داده‌های تجربی از مراجع [۵۱، ۵۲، ۶۳، ۶۵] گرفته شده‌اند.



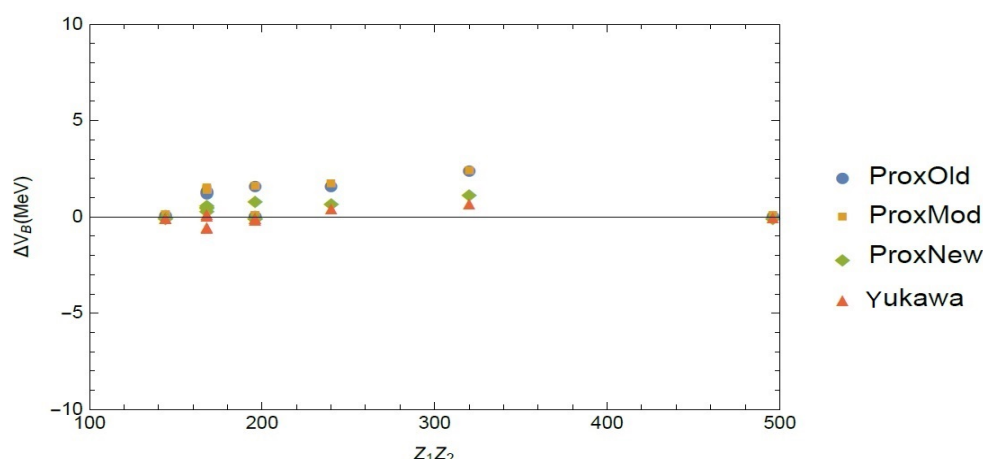
شکل ۳.۴: مقایسه ارتفاع‌های سد تئوری  $V_B^{theor}(MeV)$  مطابق با مقادیر ارتفاع‌های سد تجربی  $V_B^{expt}(MeV)$

در شکل ۴.۴ هم در صد انحراف و در شکل ۵.۴ تغییرات بین مقادیر ارتفاع سد تئوری و تجربی با استفاده از پتانسیل یوکاواگونه را می‌بینیم. دیده می‌شود که پتانسیل یوکاواگونه نسبت به پتانسیل‌های تقریبی ProxOld [۱۳] ProxMod [۱۴] و ProxNew [۵۷] نتایج بهتری می‌دهد و به داده‌های تجربی نزدیک‌تر است.





شکل ۴.۴: درصد انحراف  $\Delta V_B(\%)$  برحسب  $Z_1 Z_2$  برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف



شکل ۵.۴: تغییرات  $\Delta V_B(\text{MeV})$  برحسب  $Z_1 Z_2$  برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف

## ۲.۴ سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل یوکاواگونه

تعدادی از واکنش‌های همجوشی هم‌چون واکنش‌های  $^{24}\text{Mg} + ^{24,26}\text{Mg}$ ،  $^{24,26}\text{Mg} + ^{28,30}\text{Si}$  [۶۵] را در نظر می‌گیریم و سعی می‌کنیم داده‌های تجربی سطح مقطع را با استفاده از تئوری که پیش از این بحث شد بازتولید کنیم. در فرآیند برازش، پارامتر آزاد همان‌طور که گفته شد بگونه‌ای بدست می‌آید که کمترین انحراف استاندارد برای هر واکنش یافت شود. برای مقایسه بیش‌بینی‌های تئوری محاسبات ما و دیگران، انحراف استاندارد محاسبات خود و دیگران را با داده‌های تجربی بدست آورده و در جدول ۱.۴ نشان می‌دهیم که همان‌طور که از این جدول مشاهده می‌شود،

میزان انحراف بدست آمده با استفاده از مدل پتانسیل یوکاواگونه خیلی کمتر از سه مدل تقریبی دیگر است. داده‌های تئوری سطح مقطع همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  را برای برخورد  $^{24}Mg + ^{28}Si$  در جدول ۲.۴ نشان دادیم. برای این واکنش می‌بینیم که داده‌های تئوری سطح مقطع که با استفاده از مدل پتانسیل یوکاواگونه بدست آمده نسبت به سه مدل تقریبی دیگر خیلی نزدیک به داده‌های تجربی سطح مقطع است. همچنین داده‌های تئوری سطح مقطع در انرژی‌های  $E_{cm}$  برای برخورد  $^{26}Mg + ^{28}Si$  در جدول ۳.۴، برای واکنش  $^{24}Mg + ^{30}Si$  در جدول ۴.۴، برای واکنش  $^{26}Mg + ^{30}Si$  در جدول ۵.۴، برای واکنش  $^{28}Si + ^{28}Si$  در جدول ۶.۴، برای واکنش  $^{28}Si + ^{29}Si$  در جدول ۷.۴، برای واکنش  $^{28}Si + ^{30}Si$  در جدول ۸.۴، برای واکنش  $^{12}C + ^{92}Zr$  در جدول ۹.۴، برای واکنش  $^{16}O + ^{92}Zr$  در جدول ۱۰.۴، برای واکنش  $^{28}Si + ^{92}Zr$  در جدول ۱۱.۴، برای واکنش  $^{16}O + ^{144}Sm$  در جدول ۱۲.۴، برای واکنش  $^{24}Mg + ^{24}Mg$  در جدول ۱۳.۴ و برای واکنش  $^{24}Mg + ^{26}Mg$  در جدول ۱۴.۴ نمایش داده شده است که می‌بینیم از جزئیات داده‌های تئوری سطح مقطع بدست آمده برای پتانسیل یوکاواگونه نسبت به سه مدل تقریبی دیگر به داده‌های تجربی سطح مقطع نزدیک است و یک اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین انحراف از محاسبات ما و محاسبات دیگران وجود دارد و آن نشان می‌دهد که اصلاحات ما در نظریه موفق بوده است. همچنین سطح مقطع‌های عبوری همجوشی برحسب انرژی مرکز جرم برای واکنش‌های  $^{12}C + ^{92}Zr$  در شکل ۶.۴،  $^{16}O + ^{92}Zr$  در شکل ۷.۴،  $^{28}Si + ^{92}Zr$  در شکل ۸.۴،  $^{24}Mg + ^{28}Si$  در شکل ۹.۴،  $^{24}Mg + ^{30}Si$  در شکل ۱۰.۴،  $^{26}Mg + ^{28}Si$  در شکل ۱۱.۴،  $^{26}Mg + ^{30}Si$  در شکل ۱۲.۴،  $^{28}Si + ^{28}Si$  در شکل ۱۳.۴،  $^{28}Si + ^{29}Si$  در شکل ۱۴.۴،  $^{28}Si + ^{30}Si$  در شکل ۱۵.۴ و  $^{16}O + ^{144}Sm$  در شکل ۱۶.۴ نشان داده شده است. از شکل‌ها قابل مشاهده است که پتانسیل تقریبی به شکل پتانسیل یوکاواگونه نسبت به سه مدل تقریبی دیگر ProxOld، ProxMod و ProxNew در توافق خوبی با داده‌های تجربی است و داده‌های تجربی را بخوبی بازتولید می‌کند. در واقع از این نمودارهای سطح مقطع نیز می‌توان نتیجه گرفت که اصلاحات در نظریه موفق بوده است.

جدول ۱.۴: میزان انحراف استاندارد از داده‌های تجربی برای مدل‌های تقریبی ProxNew، ProxMod، ProxOld و مدل ما

سیستم‌های همجوشی	$\chi^{ProxOld}$	$\chi^{ProxMod}$	$\chi^{ProxNew}$	$\chi^{Ourcalculation}$
$^{24}Mg + ^{28}Si$	۲/۳۲	۲/۲۶	۱/۰۸	۰/۱۲
$^{26}Mg + ^{28}Si$	۱/۴۸	۱/۵۶	۰/۱۷	۰/۱۴
$^{24}Mg + ^{30}Si$	۲/۴۷	۲/۵۲	۱/۰۶	۰/۲۸
$^{26}Mg + ^{30}Si$	۱/۶۱	۱/۷۸	۰/۱۵	۰/۱۴
$^{24}Mg + ^{26}Mg$	۱/۳۹	۱/۵۰	۰/۶۰	۰/۱۰
$^{24}Mg + ^{24}Mg$	۰/۶۹	۰/۷۲	۰/۲۳	۰/۱۳
$^{12}C + ^{92}Zr$	۱/۸۷	۱/۸۷	۱/۶۰	۰/۴۰
$^{16}O + ^{92}Zr$	۳/۲۵	۳/۱۱	۲/۵۲	۰/۴۶
$^{28}Si + ^{92}Zr$	۵/۳۰	۴/۵۰	۳/۲۴	۰/۳۱
$^{28}Si + ^{28}Si$	۱/۳۳	۱/۲۴	۰/۴۳	۰/۲۴
$^{28}Si + ^{29}Si$	۱/۴۲	۱/۳۷	۰/۴۹	۰/۱۶
$^{28}Si + ^{30}Si$	۱/۴۱	۱/۴۰	۰/۴۹	۰/۱۵
$^{16}O + ^{144}Sm$	۳/۳۸	۳/۱۱	۲/۹۱	۰/۸۸

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه ۴۵

جدول ۲.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  
 $^{24}Mg + ^{28}Si$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۰/۹	۰/۰۷۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۲	۰/۰۹
۲۱/۴	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۲۲
۲۱/۸	۰/۴۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۴۵
۲۲/۳	۱/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۲۱	۱/۰۶
۲۲/۸	۲/۱۸	۰/۰۹	۱/۰	۰/۵۲	۲/۵۰
۲۳/۲	۶/۱۳	۰/۱۹	۰/۲۱	۱/۰۵	۴/۸۹
۲۳/۷	۱۳/۴	۰/۴۷	۰/۵۰	۲/۵۱	۱۱/۰۰
۲۴/۱	۲۵/۹	۰/۹۴	۱/۰۰۲	۵/۰۰	۲۰/۱۱
۲۴/۶	۴۱/۵	۲/۳۹	۲/۳۲	۱۱/۴۲	۳۹/۱۱
۲۵/۱	۶۷/۲	۵/۲۱	۵/۳۱	۲۴/۳۴	۶۷/۱۰
۲۵/۵	۸۷/۳	۹/۹۹	۱۰/۰۳	۴۱/۲۴	۹۴/۳۸
۲۵/۹	۱۱۵/۶	۱۸/۳۶	۱۸/۲۰	۶۴/۱۶	۱۲۴/۰۸
۲۶/۴	۱۴۴	۳۵/۸۲	۳۵/۲۰	۹۹/۱۴	۱۶۲/۴۴
۲۶/۹	۱۸۶	۶۱/۴۷	۶۰/۲۹	۱۳۷/۷۳	۲۰۰/۷۱
۲۷/۳	۲۱۵	۸۶/۴۰	۸۴/۸۹	۱۶۹/۳۸	۲۳۰/۷۵
۲۷/۸	۲۲۳	۱۲۰/۴۳	۱۱۸/۷۴	۲۰۸/۶۸	۲۶۷/۳۱
۲۸/۲	۲۵۳	۱۴۸/۴۶	۱۴۶/۷۸	۲۳۹/۵۰	۲۹۵/۷۲
۲۸/۷	۲۹۲	۱۸۳/۳۷	۱۸۱/۸۱	۲۷۷/۰۲	۳۳۰/۱۵
۲۹/۲	۳۵۲	۲۱۷/۵۶	۲۱۶/۲۱	۳۱۳/۳۵	۳۶۳/۴۳
۲۹/۶	۳۸۱	۲۴۴/۲۴	۲۴۳/۰۶	۳۴۱/۵۶	۳۸۹/۲۵
۳۰/۱	۴۲۳	۲۷۶/۶۶	۲۷۵/۷۲	۳۷۵/۷۹	۴۲۰/۵۷

جدول ۳.۴: سطح‌مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{26}Mg + ^{28}Si$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۱/۷	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۱۶
۲۲/۲	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۷	۰/۴۲
۲۲/۶	۱/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۷۷	۰/۸۸
۲۳/۰	۲	۰/۲۳	۰/۲۱	۱/۶۰	۱/۸۵
۲۳/۶	۵	۰/۶۷	۰/۶۱	۴/۷۱	۵/۵۱
۲۳/۹	۱۱/۸	۱/۱۵	۱/۰۴	۷/۹۶	۹/۳۳
۲۴/۳	۲۱/۹	۲/۳۵	۲/۰۹	۱۵/۵۳	۱۸/۱۴
۲۴/۷	۳۳/۵	۴/۷۶	۴/۱۵	۲۸/۵۶	۳۲/۹۶
۲۵/۱	۵۲/۶	۹/۳۷	۸/۰۸	۴۸/۳۸	۵۴/۷۵
۲۵/۵	۷۹/۸	۱۷/۷۰	۱۵/۱۹	۷۴/۵۸	۸۲/۵۸
۲۵/۹	۱۰۷/۳	۳۱/۲۷	۲۷/۰۰	۱۰۵/۲۹	۱۱۴/۲۷
۲۶/۴	۱۲۹/۳	۵۶/۴۲	۴۹/۶۷	۱۴۶/۷۷	۱۵۶/۲۲
۲۶/۹	۱۷۰	۸۸/۶۶	۷۹/۹۸	۱۸۹/۰۶	۱۹۸/۵۱
۲۷/۳	۲۰۴	۱۱۷/۱۹	۱۰۷/۶۰	۲۲۲/۵۳	۲۳۱/۸۱
۲۷/۷	۲۴۰	۱۴۶/۶۰	۱۳۶/۵۱	۲۵۵/۳۲	۲۶۴/۳۷
۲۸/۲	۲۶۴	۱۸۳/۳۵۳	۱۷۳/۰۱	۲۹۵/۱۸	۳۰۳/۹۱
۲۸/۶	۲۹۵	۲۱۲/۲۵	۲۰۱/۸۶	۳۲۶/۱۲	۳۳۴/۶۰
۲۹/۱	۳۱۰	۲۴۷/۴۸	۲۳۷/۱۲	۳۶۳/۶۴	۳۷۱/۷۹
۲۹/۶	۳۴۸	۲۸۱/۶۲	۲۷۱/۳۴	۳۹۹/۹۱	۴۰۷/۷۴
۳۰	۳۴۹	۳۰۸/۱۵	۲۹۷/۹۵	۴۲۸/۰۶	۴۳۵/۶۳

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه ۴۷

جدول ۴.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  
 $^{24}Mg + ^{30}Si$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۱/۱	۰/۰۷۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۰۴	۰/۱۷
۲۱/۵	۰/۲۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۹	۰/۳۵
۲۱/۹	۰/۷۶	۰/۰۳۰	۰/۰۳۱	۰/۱۸	۰/۷۳
۲۲/۴	۲/۱۲	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۴۵	۱/۸۲
۲۲/۸	۵/۷۲	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۹۴	۳/۷۶
۲۳/۲	۱۲/۲	۰/۳۱	۰/۲۹	۱/۹۴	۷/۶۱
۲۳/۷	۲۳	۰/۷۶	۰/۷۱	۴/۷۳	۱۷/۴۷
۲۴/۱	۴۱/۴	۱/۵۷	۱/۴۳	۹/۴۲	۳۱/۶۳
۲۴/۵	۶۲/۸	۳/۱۸	۲/۸۵	۱۸/۰۴	۵۲/۴۹
۲۵	۹۱/۲	۷/۵۰	۶/۶۱	۳۷/۰۴	۸۶/۶۱
۲۵/۴	۱۱۶/۱	۱۴/۳۴	۱۲/۵۴	۵۹/۷۳	۱۱۷/۸۱
۲۵/۹	۱۴۵	۲۹/۶۷	۲۶/۰۱	۹۵/۵۷	۱۵۸/۶۵
۲۶/۳	۱۷۹	۴۸/۴۱	۴۲/۹۵	۱۲۷/۶۵	۱۹۱/۴۴
۲۶/۷	۱۹۸	۷۲/۱۲	۶۵/۱۵	۱۶۰/۸۸	۲۲۳/۷۴
۲۷/۲	۲۵۰	۱۰۶/۵۰۶	۹۸/۰۹	۲۰۲/۴۷	۲۶۳/۰۹
۲۷/۶	۲۷۸	۱۳۵/۵۴	۱۲۶/۵۷	۲۳۵/۱۸	۲۹۳/۶۵
۲۸/۱	۳۰۷	۱۷۲/۱۷	۱۶۲/۹۰	۲۷۵/۰۴	۳۳۰/۶۸
۲۸/۵	۳۳۲	۲۰۱/۱۰	۱۹۱/۷۸	۳۰۶/۰۲	۳۵۹/۳۹

جدول ۵.۴: سطح‌مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{26}\text{Mg} + ^3\text{Si}$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۱	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۷
۲۱/۴	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۴
۲۱/۸	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳۰
۲۲/۴	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۶۵
۲۲/۷	۱/۶۱	۱/۶۳	۰/۱۷	۰/۲۰	۱/۶۸
۲۳/۲	۴/۰۵	۴/۱۵	۰/۴۲	۰/۵۱	۴/۲۷
۲۳/۶	۹/۶۸	۸/۵۶	۰/۸۷	۱/۰۸	۸/۸۲
۲۴	۱۹/۶	۱۶/۹۷	۱/۷۸	۲/۲۷	۱۷/۴۷
۲۴/۳	۳۶	۲۷/۱۹	۳/۰۳	۳/۹۱	۲۷/۹۶
۲۴/۶	۴۹/۸	۴۱/۵۴	۵/۱۲	۶/۶۷	۴۲/۵۹
۲۵/۱	۶۹/۲	۷۴/۳۵	۱۱/۸۴	۱۵/۴۹	۷۵/۸۳
۲۵/۵	۹۹/۸	۱۰۶/۴۳	۲۱/۹۴	۲۸/۳۱	۱۰۸/۱۳
۲۵/۹	۱۲۸/۴	۱۴۱/۱۱	۳۷/۷۵	۴۷/۴۰	۱۴۲/۹۰
۲۶/۳	۱۶۱	۱۷۶/۶۳	۵۹/۴۵	۷۲/۱۱	۱۷۸/۴۴
۲۶/۸	۱۹۹	۲۲۰/۷۷	۹۲/۷۵	۱۰۸/۰۰	۲۲۲/۵۶
۲۷/۲	۲۴۵	۲۵۵/۳۵	۱۲۲/۰۸	۱۳۸/۴۷	۲۵۷/۱۰
۲۷/۶	۲۸۹	۲۸۹/۰۹	۱۵۲/۲۳	۱۶۹/۲۳	۲۹۰/۷۹
۲۸/۱	۳۲۰	۳۳۰/۰۱	۱۸۹/۸۴	۲۰۷/۲۱	۳۳۱/۶۵
۲۸/۵	۳۵۸	۳۶۱/۷۵	۲۱۹/۳۹	۲۳۶/۸۹	۳۶۳/۳۴

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه  $^{49}$

جدول ۶.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{28}Si+$

$^{28}Si$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۷/۹	۱۵	۰/۷۱	۰/۸۷	۵/۱۳	۱۳/۹
۲۸/۹	۶۳	۳/۸۳	۴/۵۱	۲۳/۹۰	۴۹/۲۷
۲۹/۹	۸۳	۱۸/۰	۲۰/۱۸	۷۳/۲۳	۱۱۲/۷۱
۳۰/۹	۱۳۶	۵۷/۸۳	۶۱/۸۷	۱۴۲/۷۸	۱۸۳/۸۰
۳۱/۴	۱۶۱	۸۶/۵۰	۹۱/۱۴	۱۷۹/۰۱	۲۱۸/۷۸
۳۱/۹	۱۹۴	۱۱۷/۷۰	۱۲۲/۷۹	۲۱۴/۷۵	۲۵۲/۸۸
۳۲/۴	۲۳۶	۱۴۹/۶۰	۱۵۵/۰۷	۲۴۹/۶۵	۲۸۶/۰۱
۳۲/۹	۲۳۸	۱۸۱/۲۷	۱۸۷/۰۹	۲۸۳/۶۱	۳۱۸/۱۶
۳۳/۴	۳۰۲	۲۱۲/۳۰	۲۱۸/۴۶	۳۱۶/۵۹	۳۴۹/۳۷
۳۳/۹	۳۰۲	۲۱۲/۳۰	۲۱۸/۴۶	۳۱۶/۵۹	۳۴۹/۳۷
۳۳/۹	۳۰۴	۲۴۲/۵۴	۲۴۹/۰۵	۳۴۸/۶۲	۳۷۹/۶۷
۳۴/۹	۳۶۹	۳۰۰/۵۶	۳۰۷/۷۱	۴۰۹/۹۴	۴۳۷/۶۶
۳۵/۴	۳۷۲	۳۲۸/۳۶	۳۳۵/۸۲	۴۳۹/۳۰	۴۶۵/۴۲



جدول ۷.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{28}\text{Si}+$

$^{29}\text{Si}$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۷/۳۷	۱۱/۴	۰/۳۸	۰/۴۳	۳/۰۱	۹/۹۹
۲۷/۸۸	۲۱/۸	۰/۹۲	۱/۰۳	۷/۱۲	۲۱/۶۴
۲۸/۹۰	۷۶	۵/۱۸	۵/۵۷	۳۲/۷۴	۷۰/۷۰
۲۹/۹۲	۱۰۵	۲۴/۳۰	۲۵/۱۶	۹۱/۸۴	۱۴۱/۹۴
۳۰/۹۳	۱۵۹	۷۱/۷۲	۷۲/۷۴	۱۶۵/۸۹	۲۱۵/۰۵
۳۱/۹۵	۲۲۲	۱۳۶/۳۴	۱۳۷/۶۲	۲۴۰/۵۲	۲۸۵/۵۰
۳۲/۴۱	۲۶۵	۱۶۶/۳۱	۱۶۷/۸۰	۲۷۲/۹۵	۳۱۵/۹۰
۳۴	۳۴۶	۲۶۵/۶۶	۲۶۷/۹۸	۳۷۸/۵۸	۴۱۴/۷۳
۳۵	۴۰۰	۳۲۳/۸۳	۳۲۶/۶۸	۴۴۰/۱۴	۴۷۲/۳۰
۳۶/۰۲	۵۲۲	۳۷۹/۸۷	۳۸۳/۲۲	۴۹۹/۴۱	۵۲۷/۷۲
۳۶/۸۹	۵۵۴	۴۲۵/۲۱	۴۲۸/۹۸	۵۴۷/۳۷	۵۷۲/۵۸
۳۸/۰۶	۵۶۰	۴۸۲/۹۳	۴۸۷/۲۲	۶۰۸/۴۲	۶۲۹/۶۶
۳۹/۰۷	۵۴۹	۵۲۹/۹۷	۵۳۴/۶۹	۶۵۸/۱۷	۶۷۹/۱۹
۴۰/۰۹	۶۰۹	۵۷۵/۰۷	۵۸۰/۲۰	۷۰۵/۸۸	۷۲۰/۸۱
۴۰/۹۱	۷۲۰	۶۰۹/۷۰	۶۱۵/۱۵	۷۴۲/۵۰	۷۵۵/۰۶
۴۲/۱۳	۷۲۲	۶۵۸/۷۳	۶۶۴/۶۲	۷۹۴/۳۶	۸۰۳/۵۵

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
 یوکاواگونه  $^{51}$

جدول ۸.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{28}Si +$

$^{30}Si$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۷/۳۱	۱۷	۰/۴۵	۰/۴۷	۳/۸۳	۱۴/۴۸
۲۷/۸۳	۳۰	۱/۱۱	۱/۱۵	۹/۲۶	۳۰/۵۸
۲۸/۸۷	۸۳	۶/۵۹	۶/۵۷	۴۱/۸۲	۸۹/۹۵
۳۰/۹۳	۱۳۴	۳۰/۳۸	۲۹/۵۴	۱۰۸/۳۰	۱۶۵/۶۵
۳۰/۹۳	۱۹۰	۸۴/۵۱	۸۲/۴۷	۱۸۶/۴۹	۲۴۱/۱۱
۳۲/۳۸	۲۶۶	۱۸۰/۰۷	۱۷۷/۹۴	۲۹۲/۸۲	۳۴۰/۳۴
۳۳	۳۱۰	۲۲۰/۲۶	۲۱۸/۳۶	۳۳۵/۶۸	۳۸۰/۱۶
۳۴/۰۴	۳۷۷	۲۸۴/۷۶	۲۸۳/۲۹	۴۰۴/۱۱	۴۴۳/۷۱
۳۵/۰۷	۴۴۵	۳۴۴/۹۵	۳۴۸/۹۲	۴۶۷/۸۸	۵۰۲/۹۴
۳۶/۱۱	۴۶۹	۴۰۲/۲۷	۴۰۱/۶۵	۵۲۸/۵۹	۵۵۹/۰۱
۳۶/۸۸	۵۴۸	۴۴۲/۶۲	۴۴۲/۳۰	۵۷۱/۳۳	۵۹۹/۰۱
۳۷/۶۶	۵۲۶	۴۸۱/۸۱	۴۸۱/۷۷	۶۱۲/۸۵	۶۳۷/۵۶
۳۸/۶۹	۵۹۴	۵۳۱/۱۵	۵۳۱/۴۷	۶۶۵/۱۰	۶۸۶/۰۹
۳۹/۷۳	۶۶۵	۵۷۸/۳۷	۵۷۹/۰۳	۷۱۵/۱۲	۷۳۲/۵۳
۴۹/۹۲	۶۵۴	۶۲۹/۴۵	۶۳۰/۴۸	۷۶۹/۲۲	۷۸۲/۷۸
۴۱/۸۰	۷۶۴	۶۶۵/۳۶	۶۶۶/۶۵	۸۰۷/۲۶	۸۱۸/۱۰

جدول ۹.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{12}C +$

$^{92}Zr$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۸/۲۰	۰/۱۹	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۴۸
۲۹/۰۹	۱/۴۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۲۵
۲۹/۹۸	۲/۹۱	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۳/۲۴
۳۰/۸۶	۱۳/۲	۰/۹۲	۰/۶۱	۰/۶۲	۸/۱۸
۳۱/۷۵	۳۸/۶	۳/۲۷	۲/۱۸	۲/۲۷	۱۹/۸۵
۳۲/۶۳	۸۳/۶	۱۰/۹۸	۷/۳۸	۷/۹۲	۴۳/۳۳
۳۳/۵۲	۱۳۶	۳۲/۶۱	۲۲/۹۷	۲۵/۰۳	۸۲/۲۸
۳۴/۴۰	۱۹۷	۷۴/۷۸	۵۷/۲۲	۶۱/۸۳	۱۳۲/۶۴
۳۵/۳۰	۲۵۳	۱۳۳/۴۶	۱۱۰/۴۸	۱۷۷/۰۳	۱۸۹/۷۴
۳۶/۱۸	۳۰۸	۱۹۵/۵۸	۱۷۰/۲۰	۱۷۷/۴۱	۲۴۶/۴۲
۳۷/۰۷	۳۶۶	۲۵۷/۷۶	۲۳۱/۲۱	۲۳۸/۴۷	۳۰۲/۴۴
۳۷/۹۵	۴۲۱	۳۱۷/۰۳	۲۸۹/۷۳	۲۹۶/۸۲	۳۵۵/۷۶
۳۸/۸۳	۴۷۶	۳۷۳/۷۹	۳۴۵/۸۷	۳۵۲/۷۳	۴۰۶/۸۶
۴۰/۶۰	۵۷۰	۴۸۰/۵۹	۴۵۱/۵۷	۴۵۷/۹۶	۵۰۳/۱۰
۴۲/۳۸	۶۶۴	۵۷۹/۰۲	۵۴۹/۰۰	۵۵۴/۹۵	۵۹۱/۸۲
۴۴/۱۵	۷۳۱	۶۶۹/۰۳	۶۳۸/۰۹	۶۴۳/۶۴	۶۷۲/۹۶

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه  $^{53}$

جدول ۱۰.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{16}O + ^{92}Zr$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۳۷/۳۵	۰/۲۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۷۱
۳۷/۷۷	۰/۶۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۱/۰۱۸
۳۸/۲۰	۰/۷۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۱۳	۱/۴۶
۳۸/۶۲	۲/۲۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱	۰/۰/۲۴	۲/۰۹
۳۹/۰۵	۲/۴۱	۰/۰۱۶	۰/۰۲۰	۰/۰۴۶	۳/۰۱
۳۹/۴۷	۴/۶۲	۰/۰۲۹	۰/۰۳۷	۰/۰۸۵	۴/۲۸
۳۹/۹۰	۸/۷	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۵	۶/۱۲
۴۰/۳۳	۱۵/۲	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۳۰	۸/۷۰
۴۰/۷۵	۲۳/۱	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۵۵	۱۲/۱۹
۴۱/۱۸	۳۳/۸	۰/۳۷	۰/۴۴	۱/۰۳	۱۷/۰۵
۴۱/۶۱	۴۹/۲	۰/۶۹	۰/۸۱	۱/۹۳	۲۳/۵۶
۴۲/۰۳	۶۵/۷	۱/۲۹	۱/۴۹	۳/۵۲	۳۱/۸۱
۴۲/۴۶	۸۶/۲	۲/۴۱	۲/۷۴	۶/۴۲	۴۲/۴۵
۴۲/۸۹	۱۰۵	۴/۴۶	۵/۰۰	۱۱/۴۴	۵۵/۴۵
۴۳/۳۱	۱۲۸	۷/۹۸	۸/۸۰	۱۹/۳۶	۷۰/۳۸
۴۳/۷۴	۱۵۱	۱۴/۰۵	۱۵/۲۴	۳۱/۴۸	۸۷/۷۳
۴۴/۱۷	۱۷۴	۲۳/۵۹	۲۵/۱۹	۴۷/۹۶	۱۰۶/۸۳
۴۵/۰۲	۲۲۳	۵۷/۴۷	۵۶/۷۴	۹۰/۷۸	۱۴۸/۲۰
۴۵/۸۷	۲۷۰	۹۷/۴۹	۱۰۰/۱۶	۱۴۰/۲۶	۱۹۲/۰۵
۴۶/۳۰	۲۹۹	۱۲۱/۳۶	۱۲۴/۲۱	۱۶۵/۹۱	۲۱۴/۵۳
۴۶/۷۳	۳۲۵	۱۴۵/۶۷	۱۴۸/۷۰	۱۹۱/۴۷	۲۳۶/۹۷
۴۷/۱۵	۳۴۷	۱۶۹/۴۶	۱۷۲/۶۶	۲۱۶/۱۸	۲۵۸/۷۶
۴۷/۵۰	۳۶۷	۱۸۹/۱۵	۱۹۲/۵۱	۲۳۶/۵۳	۲۷۶/۷۵
۴۹/۲۰	۴۵۹	۲۸۱/۶۷	۲۸۵/۸۱	۳۳۱/۵۹	۳۶۱/۴۲
۵۰/۹۹	۵۴۳	۳۷۲/۷۳	۳۷۷/۶۶	۴۲۴/۹۶	۴۴۵/۰۴
۵۲/۷۰	۶۲۶	۴۵۳/۹۷	۴۵۹/۶۰	۵۰۸/۲۵	۵۱۹/۷۴
۵۴/۴۰	۶۸۷	۵۲۹/۶۷	۵۳۵/۹۶	۵۸۵/۸۵	۵۸۹/۳۷
۵۶/۱۱	۷۵۴	۶۰۱/۱۸	۶۰۸/۱۰	۶۵۹/۱۷	۶۵۵/۱۵
۵۷/۸۱	۸۱۳	۶۸۸/۰۹	۶۷۵/۵۸	۷۲۷/۷۷	۷۱۶/۷۰
۵۹/۵۲	۸۶۷	۷۳۱/۵۳	۷۳۹/۵۷	۷۹۲/۸۱	۷۷۵/۰۵
۶۱/۲۳	۹۱۲	۷۹۱/۴۳	۷۹۹/۹۹	۸۵۴/۲۲	۸۳۰/۱۵
۶۲/۹۳	۹۷۱	۸۴۷/۷۵	۸۵۶/۸۱	۹۱۱/۹۶	۸۸۱/۹۶

جدول ۱۱.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{28}\text{Si}+$

$^{92}\text{Zr}$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۶۵/۴۰	۰/۹۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۱/۸۵
۶۶/۱۶	۱/۷۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۲/۸۶
۶۶/۹۳	۴/۴۹	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۴/۴۲
۶۷/۷۰	۷/۲۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲	۶/۸۰
۶۸/۴۶	۱۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۷	۱۰/۳۱
۶۹/۲۳	۲۳/۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۲۲	۱۵/۵۴
۷۰/۰۰	۳۸/۸	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۶۸	۲۳/۰۳
۷۰/۷۶	۵۴/۲	۰/۱۱	۰/۳۳	۲/۰۷	۳۳/۲۳
۷۱/۵۸	۷۷/۸	۰/۳۶	۱/۱۰	۶/۵۰	۴۷/۸۶
۷۲/۳۰	۹۴/۹	۱/۰۵	۳/۰۴	۱۶/۰۴	۶۳/۹۶
۷۳/۱۹	۱۲۵	۳/۷۲	۹/۸۹	۳۸/۹۵	۸۷/۸۰
۷۳/۸۳	۱۴۱	۸/۷۳	۲۰/۶۲	۶۱/۹۵	۱۰۷/۲۰
۷۴/۶۰	۱۷۰	۲۱/۳۳	۴۱/۵۸	۹۳/۱۷	۱۳۲/۴۲
۷۵/۳۶	۱۹۷	۴۲/۰۸	۶۸/۵۵	۱۲۵/۱۸	۱۵۸/۶۹
۷۶/۱۳	۲۱۶	۶۸/۹۱	۹۸/۶۵	۱۵۷/۵۹	۱۸۶/۱۲
۷۶/۹۰	۲۵۲	۹۸/۱۳	۱۲۹/۴۲	۱۸۹/۵۶	۲۱۳/۹۳
۷۸/۴۳	۳۰۲	۱۵۶/۹۳	۱۸۹/۷۵	۲۵۱/۳۷	۲۶۹/۱۵
۷۹/۲۰	۳۳۵	۱۸۵/۹۶	۲۱۹/۳۵	۲۸۱/۵۹	۲۹۶/۵۸
۷۹/۹۶	۳۶۵	۲۱۴/۰۹	۲۴۸/۰۲	۳۱۰/۸۵	۳۲۳/۹۶
۸۰/۷۳	۳۸۳	۲۴۲/۰۷	۲۷۶/۵۲	۳۳۹/۹۴	۳۴۹/۹۶
۸۱/۵۰	۴۰۴	۲۶۹/۵۲	۳۰۴/۴۸	۳۶۸/۴۷	۳۷۶/۱۸
۸۸/۱۷	۶۰۳	۴۸۷/۲۶	۵۲۶/۲۷	۵۹۴/۷۸	۵۸۴/۸۷

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه ۵۵

جدول ۱۲.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{16}O+$

$^{144}Sm$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۵۶/۵۹	۰/۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۹۴
۵۷/۰۴	۰/۳۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۱/۲۷
۵۷/۴۹	۰/۴۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۱/۷۰
۵۷/۹۴	۱/۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۲/۲۹
۵۸/۳۹	۱۲/۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۳/۰۷
۵۸/۸۴	۵/۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۴/۱۱
۵۹/۲۹	۱۰/۲	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۱	۵/۵۰
۵۹/۷۴	۱۷/۵	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۷/۳۲
۶۰/۱۹	۲۸/۶	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۳۸	۹/۷۲
۶۰/۶۴	۴۱/۳	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۶۸	۱۲/۸۴
۶۱/۰۹	۵۵/۵	۰/۶۸	۰/۹۳	۱/۲۱	۱۶/۸۶
۶۱/۵۴	۷۱/۲	۱/۲۲	۱/۶۶	۲/۱۴	۲۱/۹۵
۶۱/۹۹	۹۰/۶	۲/۱۹	۲/۹۲	۳/۷۷	۲۸/۳۰
۶۲/۴۴	۱۰۸	۳/۸۷	۵/۰۹	۶/۵۲	۳۶/۰۹
۶۲/۸۹	۱۳۱	۶/۷۵	۸/۶۹	۱۱/۰۴	۴۵/۴۲
۶۳/۳۴	۱۵۰	۱۱/۴۸	۱۴/۴۴	۱۸/۰۵	۵۶/۳۴
۶۳/۷۹	۱۶۹	۱۸/۸۰	۲۳/۰۱	۲۸/۱۸	۶۸/۸۵
۶۴/۲۴	۱۸۴	۲۹/۲۹	۳۴/۸۵	۴۱/۶۵	۸۲/۸۲
۶۴/۶۹	۲۰۸	۴۳/۰۶	۴۹/۸۷	۵۸/۱۲	۹۸/۰۹
۶۵/۵۹	۲۵۳	۷۸/۳۸	۸۶/۹۱	۹۷/۰۸	۱۳۱/۷۳
۶۶/۴۹	۲۹۵	۱۱۹/۰۷	۱۲۸/۵۲	۱۳۹/۵۶	۱۶۸/۰۸
۶۷/۳۹	۳۴۸	۱۶۱/۰۷	۱۷۱/۰۸	۱۸۲/۵۳	۲۰۵/۷۲
۶۸/۲۹	۳۸۳	۲۰۲/۷۳	۲۱۳/۲۱	۲۲۴/۸۸	۲۴۳/۷۱
۷۰/۰۸	۴۶۹	۲۸۲/۹۴	۲۹۴/۲۵	۳۰۶/۲۶	۳۱۸/۲۵
۷۱/۸۸	۵۵۲	۳۵۹/۶۸	۳۷۱/۷۸	۳۸۴/۰۸	۳۹۰/۴۴
۷۶/۳۸	۷۰۰	۵۳۵/۷۴	۵۴۹/۶۵	۵۶۲/۶۱	۵۵۶/۸۲
۸۰/۸۸	۸۷۶	۶۹۲/۲۲	۷۰۷/۷۳	۷۲۱/۲۸	۷۰۴/۸۴
۸۹/۸۸	۱۰۷۶	۹۵۸/۱۷	۹۷۶/۳۹	۹۹۰/۹۴	۹۵۶/۴۱

جدول ۱۳.۴: سطح‌مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{24}\text{Mg}$

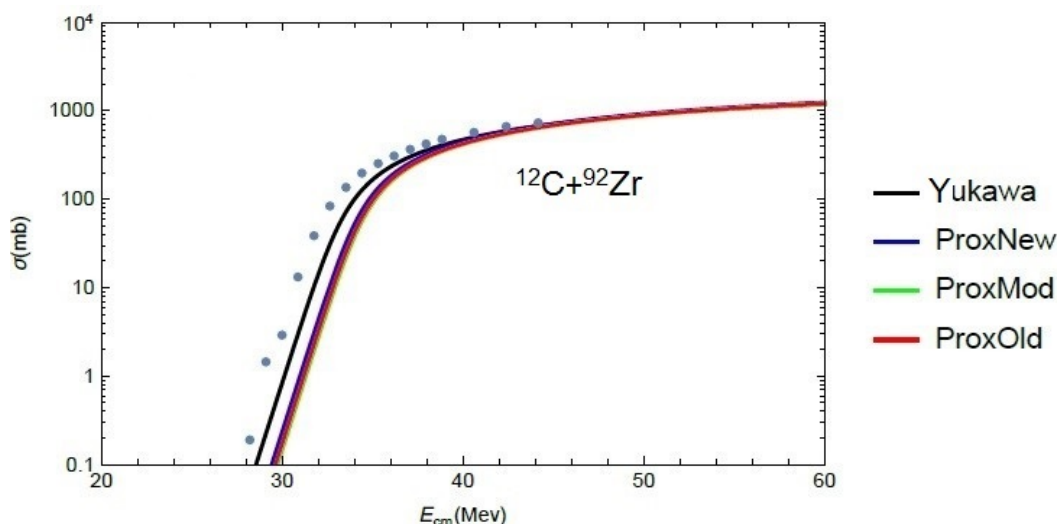
$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۱	۲۵	۱/۷۱	۱/۶۰	۸/۱۸	۲۱/۱۳
۲۲/۵	۸۵	۲۰/۸۷	۱۸/۶۴	۶۸/۶۴	۱۱۷/۳۶
۲۲/۵	۸۰	۲۰/۸۷	۱۸/۶۴	۶۸/۶۴	۱۱۷/۳۶
۲۴	۱۸۴	۱۰۵/۶۵	۹۸/۰۳	۱۹۴/۰۰	۲۴۶/۶۱
۲۵/۵	۳۰۳	۲۱۹/۸۷	۲۱۱/۲۵	۳۱۹/۱۷	۳۶۵/۰۰
۲۷	۳۸۸	۳۲۵/۸۲	۳۱۷/۵۰	۴۳۱/۴۲	۴۷۰/۴۷
۲۸	۴۹۲	۳۹۰/۳۴	۳۸۲/۲۷	۴۹۹/۶۲	۵۳۴/۵۲
۲۸	۵۳۸	۳۹۰/۳۴	۳۸۲/۲۷	۴۹۹/۶۲	۵۳۴/۵۲
۲۹	۵۶۸	۴۵۰/۴۲	۴۴۲/۵۹	۵۶۳/۱۱	۵۹۴/۱۴
۲۹	۵۸۵	۴۵۰/۴۲	۴۴۲/۵۹	۵۶۳/۱۱	۵۹۴/۱۴
۳۰	۶۱۳	۵۰۶/۵۰	۴۹۸/۹۰	۶۲۲/۳۸	۶۴۹/۷۹
۳۱	۶۲۷	۵۵۸/۹۶	۵۵۱/۵۷	۶۷۷/۸۱	۷۰۱/۸۵
۳۱	۷۰۴	۵۵۸/۹۶	۵۵۱/۵۷	۶۷۷/۸۱	۷۰۱/۸۵
۳۲/۰۵	۷۲۹	۶۱۰/۵۲	۶۰۳/۳۴	۷۳۲/۳۰	۷۵۳/۰۲
۳۲/۰۸	۷۴۵	۶۱۱/۹۴	۶۰۴/۷۷	۷۳۳/۸۱	۷۵۴/۴۳
۳۳/۰۵	۷۸۴	۶۵۶/۵۸	۶۴۹/۵۹	۷۸۰/۹۸	۷۹۸/۷۳
۳۴/۰۶	۷۹۰	۷۰۰/۳۵	۶۹۳/۵۴	۸۲۷/۲۳	۸۴۲/۱۷
۳۴/۸	۹۰۱	۷۳۰/۸۱	۷۲۴/۱۳	۸۵۹/۴۲	۸۷۲/۴۰
۳۶/۰۸	۸۷۰	۷۸۰/۵۵	۷۷۴/۰۷	۹۱۱/۹۸	۹۲۱/۷۶
۳۶/۸۲	۹۵۶	۸۰۷/۷۲	۸۰۱/۳۵	۹۹۴۰/۷۰	۹۴۸/۷۳
۳۷/۶	۹۳۵	۸۳۵/۲۱	۸۲۸/۹۵	۹۶۹/۷۵	۹۷۶/۰۰
۳۸/۶	۹۶۱	۸۶۸/۸۳	۸۶۲/۷۰	۱۰۰۵/۲۸	۱۰۹/۳۶
۳۹/۶	۱۰۵۷	۹۰۰/۷۴	۸۹۴/۷۵	۱۰۳۹/۰۱	۱۰۴۱/۰۴
۴۰/۶	۱۰۳۱	۹۳۱/۰۹	۲۹۲۵/۲۲	۱۰۷۱/۰۷	۱۰۷۱/۱۵
۴۱/۶۰	۱۰۰۰	۹۵۹/۹۸	۹۵۴/۲۲	۱۱۰۱/۶۰	۱۰۹۹/۸۲

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه ۵۷

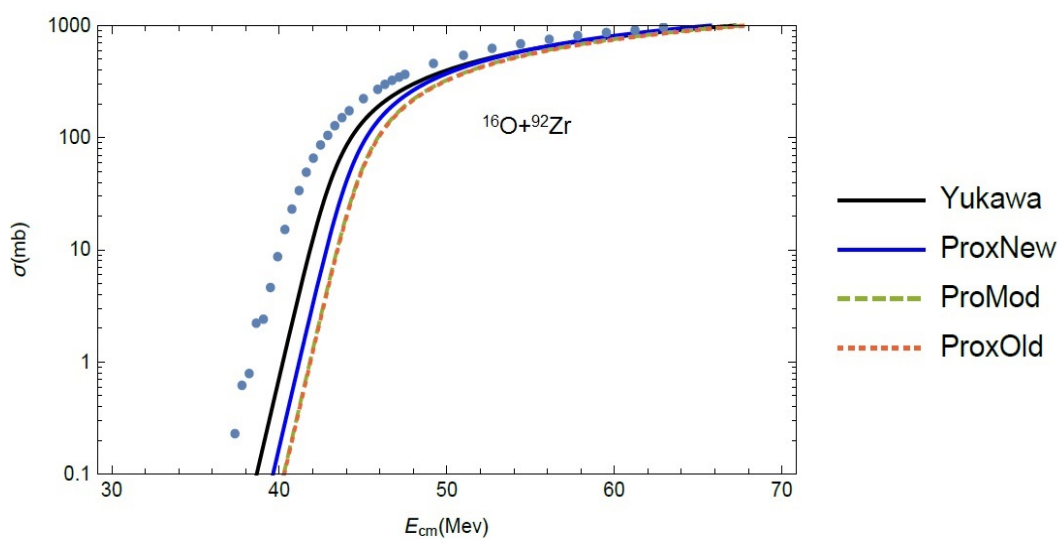
جدول ۱۴.۴: سطح مقطع تئوری همجوشی به ازای انرژی‌های  $E_{cm}$  برای واکنش  
 $^{24}\text{Mg} + ^{26}\text{Mg}$

$E_{cm}$ (MeV)	$\sigma^{exp}$ (mb)	$\sigma^{ProxOld}$ (mb)	$\sigma^{ProxMod}$ (mb)	$\sigma^{ProxNew}$ (mb)	$\sigma^{Ourmodel}$ (mb)
۲۰/۳۲	۲۸	۰/۸۲	۰/۶۸	۴/۶۵	۲۴/۴۵
۲۱/۸۹	۱۲۰	۱۳/۴۴	۱۰/۵۱	۵۵/۸۳	۱۳۵/۱۶
۲۱/۸۹	۱۱۰	۱۳/۴۴	۱۰/۵۱	۵۵/۸۳	۱۳۵/۱۶
۲۳/۴۹	۲۴۱	۹۴/۳۵	۸۰/۲۸	۱۹۱/۲۶	۲۷۵/۹۷
۲۵/۰۳	۳۶۳	۲۱۹/۷۲	۲۰۲/۲۸	۳۳۰/۶۶	۴۰۲/۶۴
۲۸/۱۶	۵۷۴	۴۳۹/۹۳	۴۲۲/۱۵	۵۶۴/۵۲	۶۱۳/۳۵
۲۸/۱۶	۵۵۹	۴۳۹/۹۳	۴۲۲/۱۵	۵۶۴/۵۲	۶۱۳/۳۵
۲۹/۷۳	۶۶۱	۵۳۳/۰۹	۵۱۵/۲۸	۶۶۳/۳۱	۷۰۲/۳۳
۳۱/۳۰	۷۱۲	۶۱۶/۹۰	۵۹۹/۰۷	۷۵۲/۱۹	۷۸۲/۳۹
۳۲/۸۷	۸۲۰	۶۹۲/۷۱	۶۷۱/۸۵	۸۳۲/۵۸	۸۵۴/۷۹
۳۲/۸۷	۸۰۲	۶۹۲/۷۱	۶۷۴/۸۵	۸۳۲/۵۸	۸۵۴/۷۹

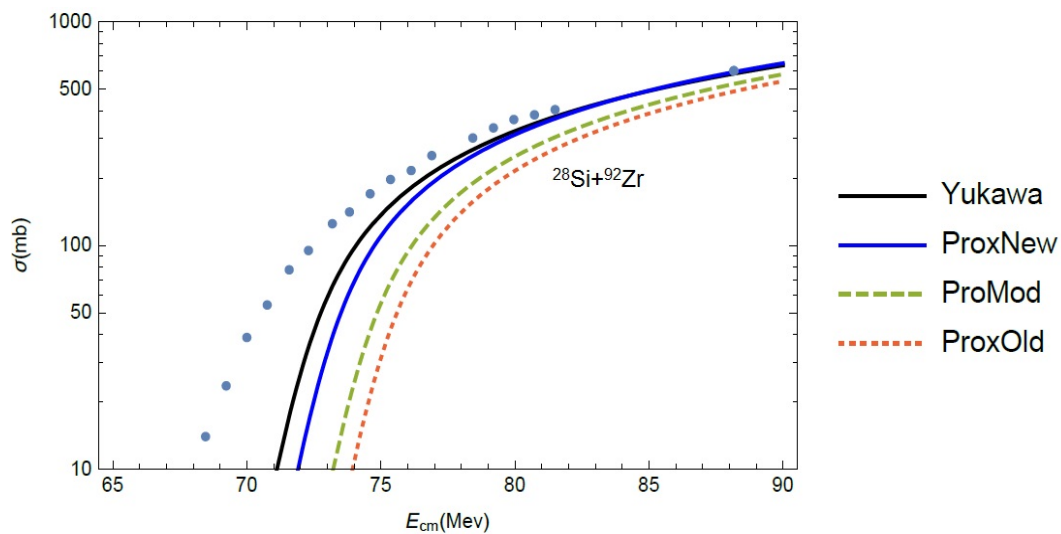




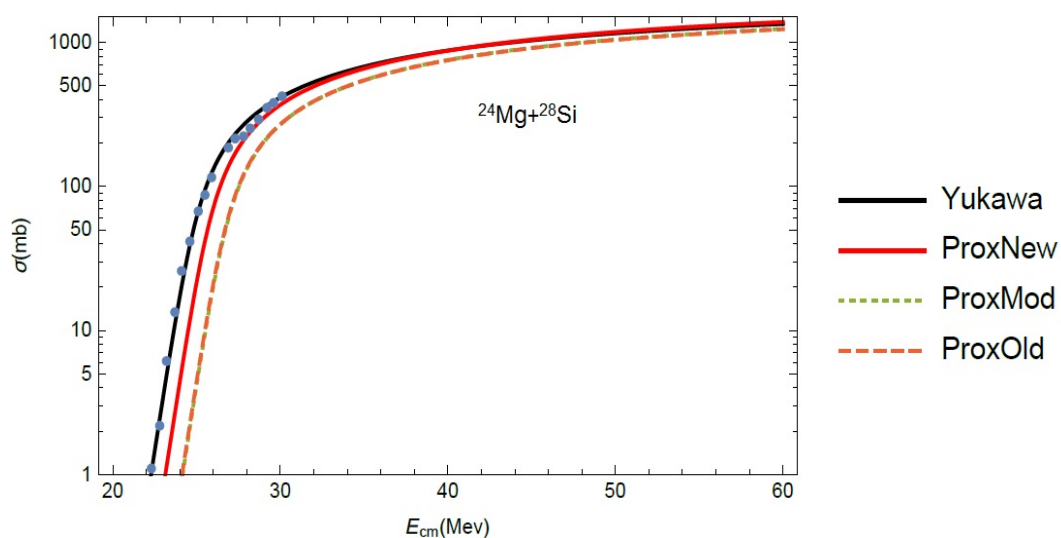
شکل ۶.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{12}\text{C} + ^{92}\text{Zr}$



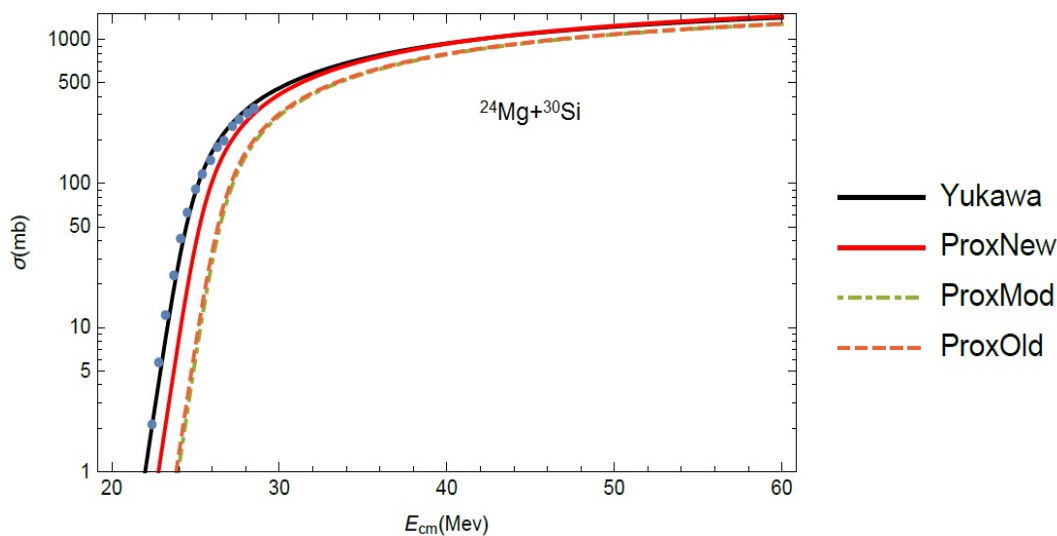
شکل ۷.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{16}\text{O} + ^{92}\text{Zr}$



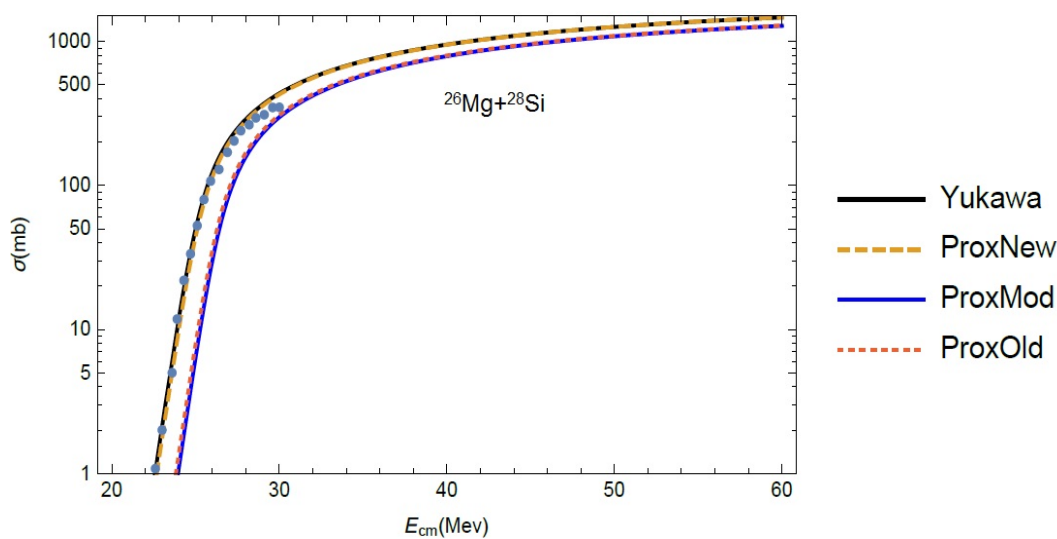
شکل ۸.۴: سطح مقطع همجوشی بر حسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{92}\text{Zr}$



شکل ۹.۴: سطح مقطع همجوشی بر حسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$

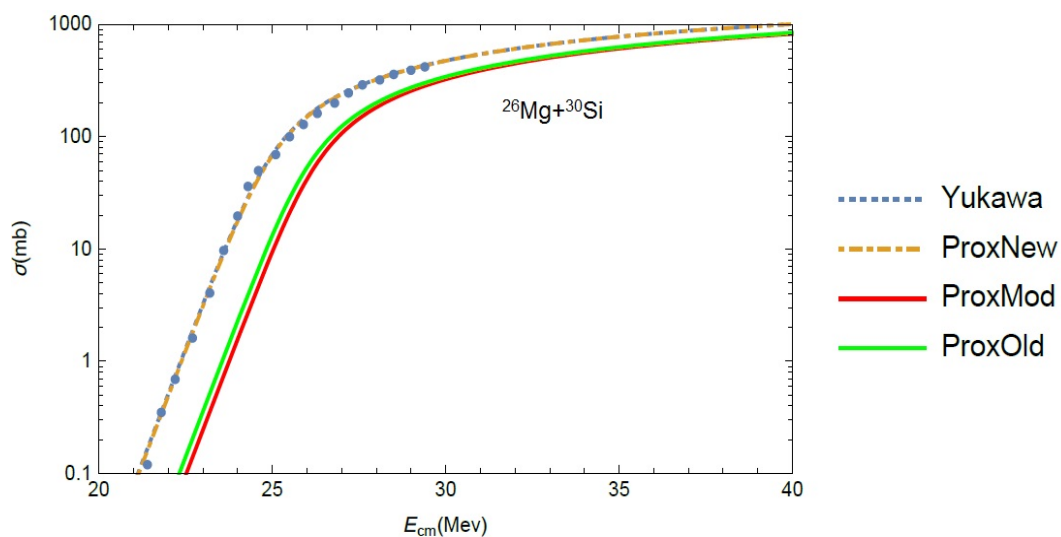


شکل ۱۰.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{30}\text{Si}$

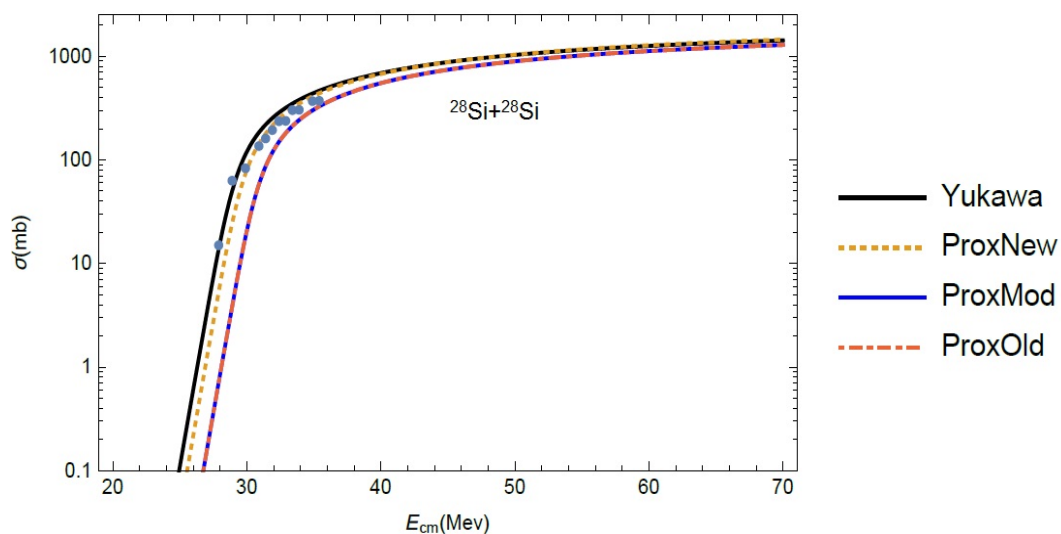


شکل ۱۱.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{26}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$

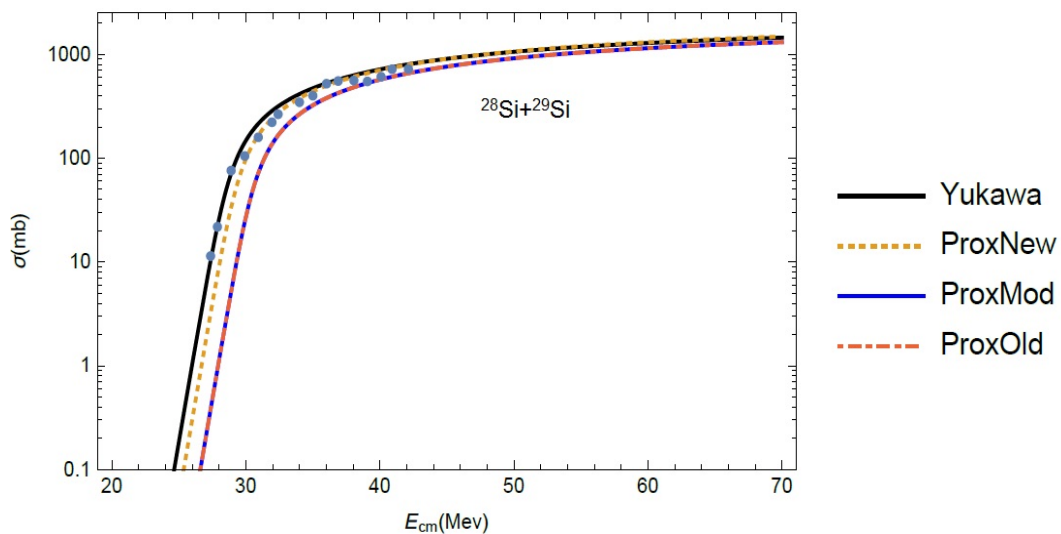
سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه ۶۱



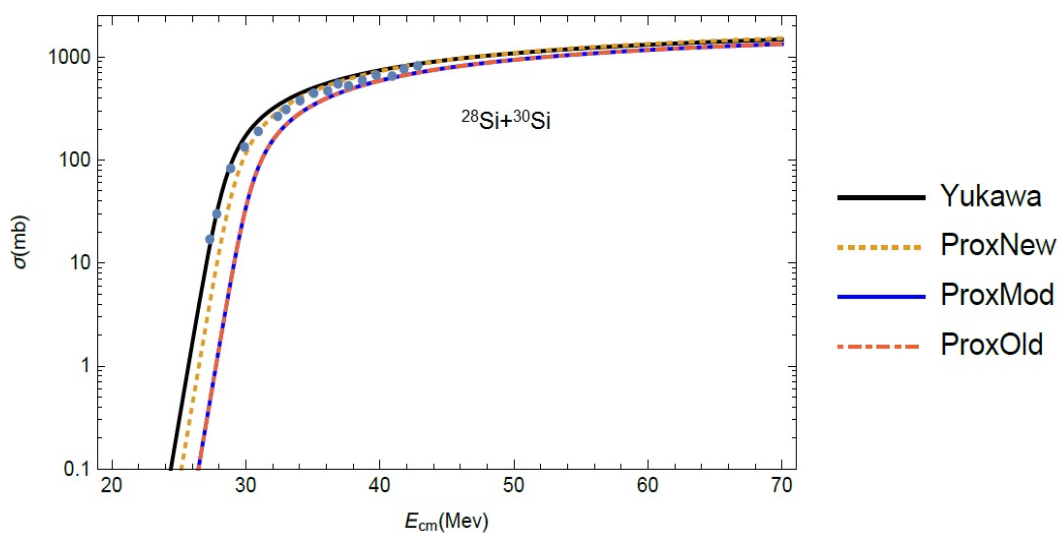
شکل ۱۲.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل  
های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{26}\text{Mg} + ^{30}\text{Si}$



شکل ۱۳.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل  
های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$

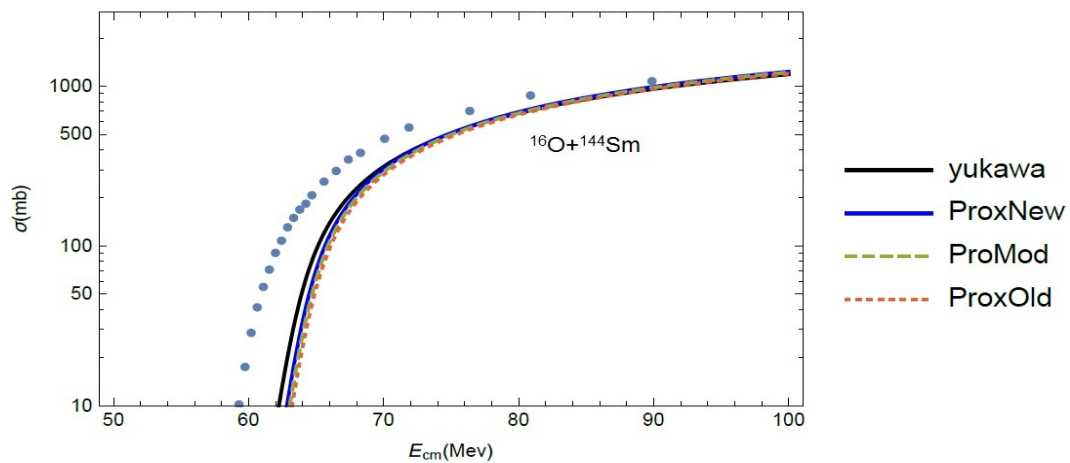


شکل ۱۴.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{29}\text{Si}$



شکل ۱۵.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل‌های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{30}\text{Si}$

سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها با در نظر گرفتن پتانسیل  
یوکاواگونه  $^{63}$



شکل ۱۶.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای پتانسیل  
های تقریبی مختلف و مدل ما برای واکنش  $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$

## ۳.۴ پتانسیل جدید به شکل پتانسیل وود-ساکسون اصلاح‌شده

بخش هسته‌ای از پتانسیل برهمکنش  $V_N(r)$  را به شکل پتانسیل وودساکسون اصلاح‌شده به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$V_N(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp\left[\frac{(r-R_0)}{a}\right]} - \frac{V_1}{\left(1 + \exp\left[\frac{(r-R_0)}{a}\right]\right)^2} \quad (7.4)$$

در این معادله پارامتر تصحیح  $V_1$  از روش برازش داده‌های تجربی با استفاده از روش حداقل مربعات به شرطی که انحراف از داده‌های تجربی مینیمم شود بدست می‌آید. پارامتر  $V_0$  در معادله نیز به صورت رابطه زیر است [۱۵].

$$V_0 = 16\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gamma a \quad (8.4)$$

که  $a = 0.63 \text{ fm}$  است

$$R_0 = R_1 + R_2 + 0.29 \quad (9.4)$$

که  $R_i$  به فرم زیر است.

$$R_i = 1.233 A_i^{1/3} - 0.98 A_i^{-1/3} \text{ fm} \quad (i = 1, 2) \quad (10.4)$$

$$\gamma = \gamma_0 \left[ 1 - k_s \left( \frac{N_p - Z_p}{A_p} \right) \left( \frac{N_t - Z_t}{A_t} \right) \right] \quad (11.4)$$

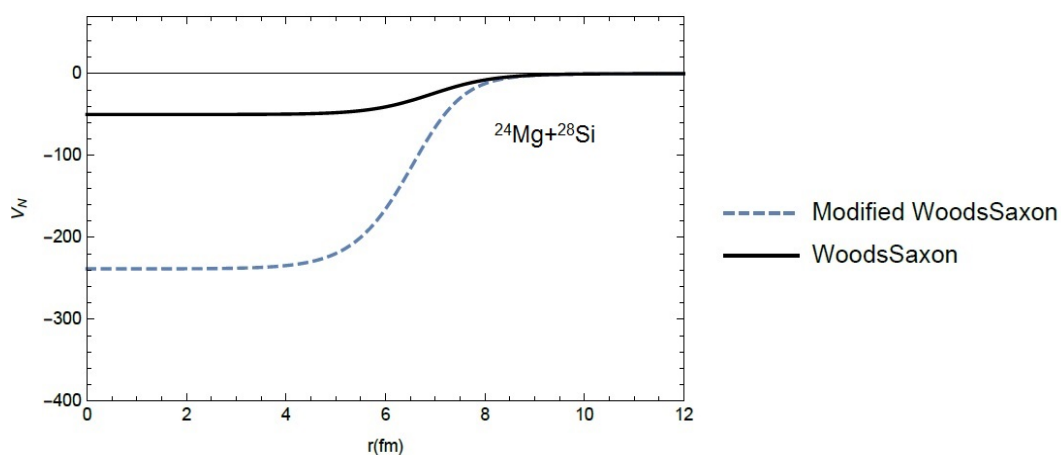
که  $\gamma_0 = 0.95 \text{ MeV/fm}^2$  و  $k_s = 1/8$  است.  $V_1$  نیز پارامتر تصحیح است.

در واقع برای صحت این مدل نیز از حل عددی استفاده می‌کنیم پیش‌بینی‌های تئوری از روش حداقل مربعات (rms) به صورت معادله (۶.۴) است. ارتفاع‌های سد با استفاده از پتانسیل وودساکسون اصلاح‌شده و چند پتانسیل تقریبی برای مقایسه با داده‌های تجربی بدست آمده است. پارامتر تصحیح  $V_1$  را نیز برای واکنش‌های  $^{16}O + ^{92}Zr$ ,  $^{144}Sm$ ,  $^{154}Sm$ ,  $^{208}Pb$ ,  $^{24}Mg + ^{26,24}Mg$  و  $^{28}Si + ^{30,29,28}Si$ ,  $^{26,24}Mg + ^{30,28}Si$  را بدست آورده و همچنین انحراف استاندارد از داده‌های تجربی را که با  $\chi$  نشان دادیم برای این واکنش‌ها بدست آوردیم و نتایج در جدول ۱۵.۴ نشان داده شده است که ارتفاع سد همجوشی با استفاده از پتانسیل اصلاح‌شده وودساکسون بسیار نزدیکتر به داده‌های تجربی ارتفاع سد است و میزان انحراف استاندارد از داده‌های تجربی سطح مقطع برای این واکنش‌ها کمتر از یک است. [۵۱، ۵۲، ۶۳، ۶۵، ۶۶].

در شکل ۱۷.۴ بخش هسته‌ای از پتانسیل برهمکنش  $V_N(r)$  برحسب تابعی از فاصله  $r$  و در شکل ۱۸.۴ پتانسیل برهمکنش کل  $V_T(r)$  برحسب تابعی از  $r$  با استفاده از پتانسیل وودساکسون اصلاح‌شده برای واکنش  $^{24}Mg + ^{28}Si$  نمایش می‌دهیم.

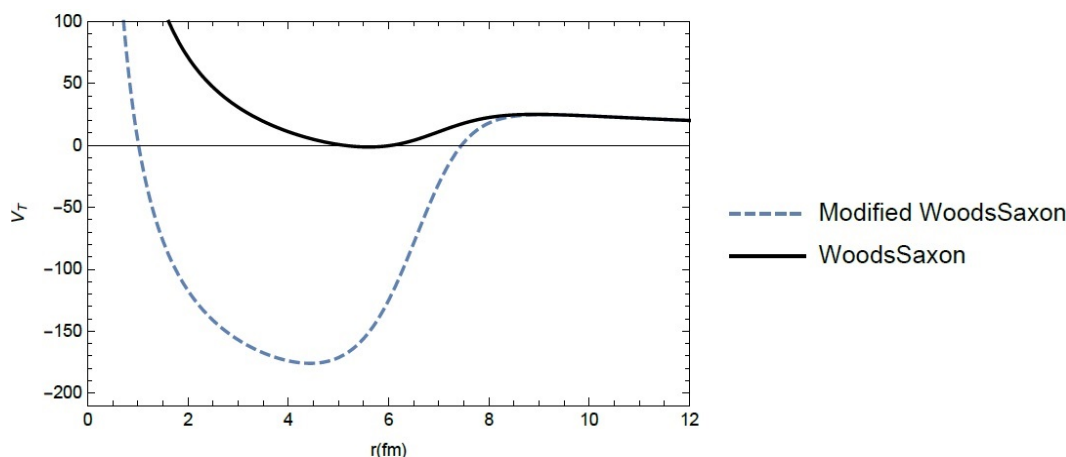
جدول ۱۵.۴: مقایسه ارتفاع سد پتانسیل‌های تقریبی مختلف و پتانسیل تقریبی اصلاح‌شده به همراه ارتفاع سد تجربی

سیستم‌های همجوشی	$V_B^{exp}$ (MeV)	$V_B^{Prox77}$ (MeV)	$V_B^{AW95}$ (MeV)	$V_B^{BW91}$ (MeV)	$V_B$ (MeV) محاسبات ما	$V_1$ (MeV)	$\chi$
$^{28}Si + ^{28}Si$	۲۸/۹	۳۰/۲	۲۸/۸	۲۸/۸	۲۸/۷۵	۴۹/۴	۰/۲۷
$^{28}Si + ^{29}Si$	۲۸/۵	۳۰/۰	۲۸/۶	۲۸/۶	۲۸/۴۵	۱۴۳/۱	۰/۲۱
$^{28}Si + ^{30}Si$	۲۸/۲	۲۹/۸	۲۸/۵	۲۸/۴	۲۸/۲۱	۲۱۳/۰	۰/۲۱
$^{24}Mg + ^{24}Mg$	۲۱/۵	۲۲/۸	۲۱/۷	۲۱/۸	۲۱/۷۴	۷۴/۰	۰/۱۵
$^{24}Mg + ^{26}Mg$	۲۰/۸	۲۲/۵	۲۱/۴	۲۱/۵	۲۱/۰۸	۶۸۶/۳	۰/۱۷
$^{24}Mg + ^{28}Si$	۲۵/۰	۲۶/۳	۲۵/۰	۲۵/۰	۲۴/۸۶	۱۸۸/۵	۰/۶۴
$^{24}Mg + ^{30}Si$	۲۴/۷	۲۵/۹	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۵۶	۱۹۷/۰۳	۰/۴۰
$^{26}Mg + ^{28}Si$	۲۴/۶	۲۵/۹	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷۴	۰/۰۱	۰/۲۱
$^{26}Mg + ^{30}Si$	۲۴/۴	۲۵/۶	۲۴/۴	۲۴/۴	۲۴/۷۴	۰/۰۱	۰/۲۲
$^{16}O + ^{92}Zr$	۴۲/۰	۴۴/۳	۴۲/۶	۴۲/۴	۴۱/۵۸	۵۳۲/۶	۰/۱۷
$^{16}O + ^{144}Sm$	۶۱/۱	۶۴/۱	۶۲/۰	۶۱/۴	۶۰/۹۰	۱۴۷/۵	۰/۲۶
$^{16}O + ^{154}Sm$	۵۹/۴	۶۳/۲	۶۱/۱	۶۰/۵	۵۸/۰۵	۲۲۴۶/۰	۰/۴۴
$^{16}O + ^{208}Pb$	۷۴/۵	۷۹/۳	۷۷/۰	۷۶/۰	۷۴/۳۹	۶۱۱/۸	۰/۲۴



شکل ۱۷.۴: بخش هسته‌ای  $V_N(r)$  برهمکنش کل برای واکنش  $^{24}Mg + ^{28}Si$

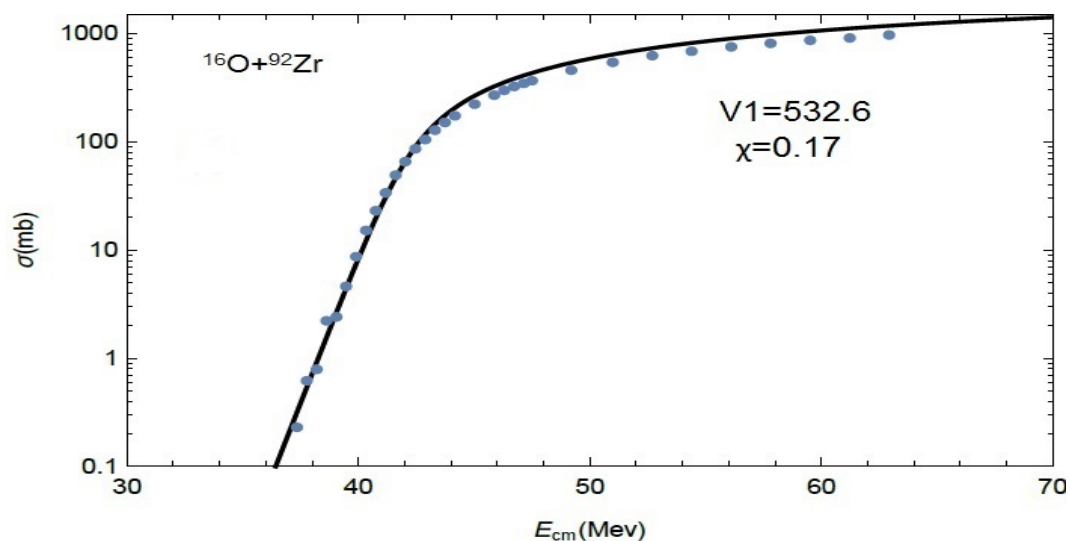




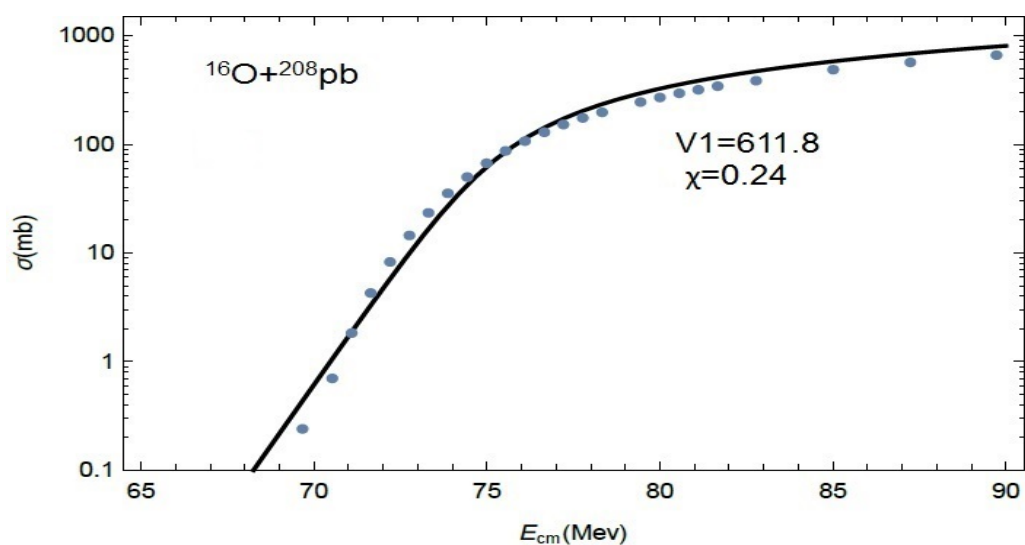
شکل ۱۸.۴: پتانسیل برهمکنش کل (هسته ای + کولنی)  $V_T(r)$  برحسب تابع  $r$  برای واکنش  $^{24}Mg + ^{28}Si$

## ۴.۴ سطح مقطع‌های همجوشی برای تعدادی از واکنش‌ها بادر نظر گرفتن پتانسیل اصلاح‌شده وود ساکسون

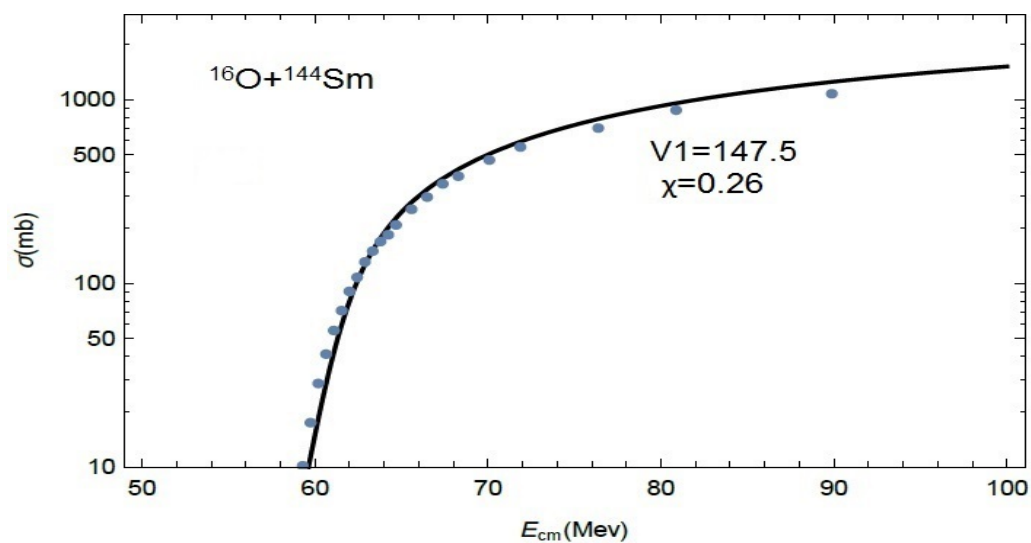
دقت پتانسیل اصلاح‌شده وود ساکسون در مورد احتمال همجوشی بررسی شده است. سطح مقطع‌های عبوری همجوشی  $\sigma_{fus}$  برحسب تابعی از انرژی مرکز جرم  $E_{cm}$  برای واکنش‌های  $^{16}O + ^{92}Zr$  در شکل ۱۹.۴،  $^{16}O + ^{144}Sm$  در شکل ۲۱.۴،  $^{16}O + ^{154}Sm$  در شکل ۲۳.۴،  $^{16}O + ^{208}Pb$  در شکل ۲۱.۴،  $^{24}Mg + ^{28}Si$  در شکل ۲۳.۴،  $^{24}Mg + ^{28}Si$  در شکل ۲۴.۴،  $^{24}Mg + ^{30}Si$  در شکل ۲۵.۴،  $^{26}Mg + ^{30}Si$  در شکل ۲۶.۴،  $^{28}Si + ^{28}Si$  در شکل ۲۷.۴،  $^{28}Si + ^{29}Si$  در شکل ۲۸.۴،  $^{28}Si + ^{30}Si$  در شکل ۲۹.۴،  $^{24}Mg + ^{24}Mg$  در شکل ۳۰.۴ و  $^{24}Mg + ^{26}Mg$  در شکل ۳۱.۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارهای سطح مقطع دیده می‌شود که پتانسیل وود ساکسون اصلاح‌شده در توافق خوبی با داده‌های تجربی است و میزان انحراف استاندارد برازش از داده‌های تجربی با در نظر گرفتن این پتانسیل اصلاح‌شده برای برخوردهایی که در نظر گرفته شدند کوچکتر از یک است و نتیجه می‌گیریم که برازش بخوبی انجام شده است.



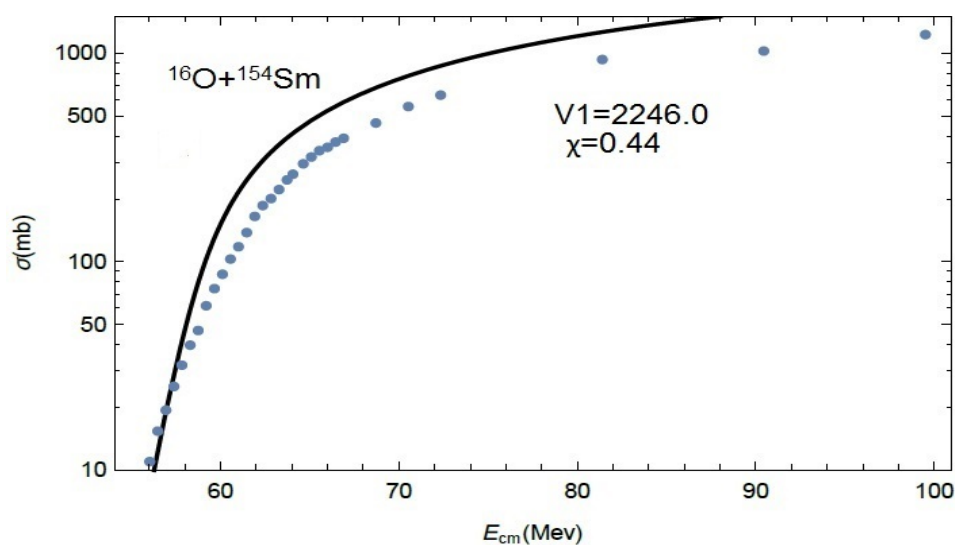
شکل ۱۹.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{16}\text{O} + ^{92}\text{Zr}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



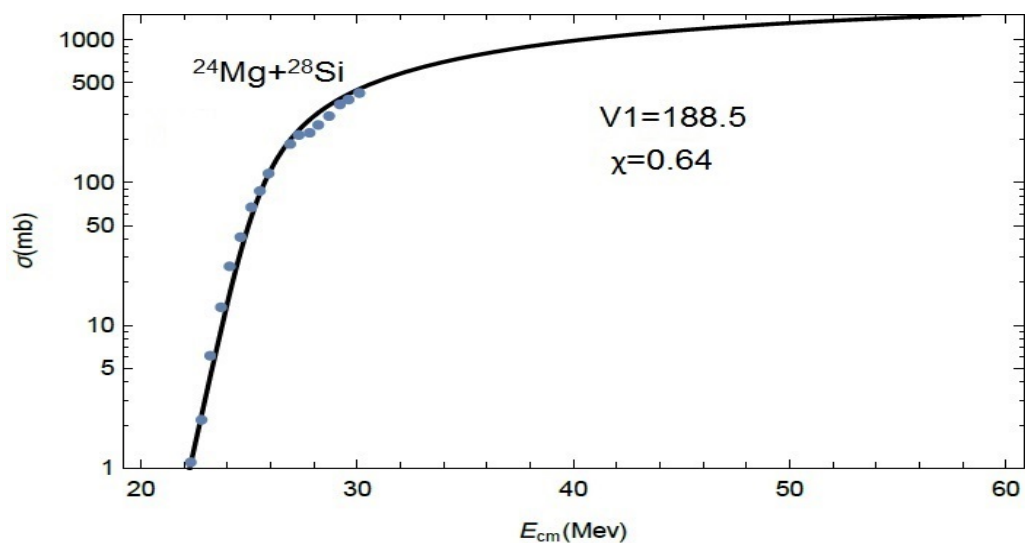
شکل ۲۰.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{pb}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



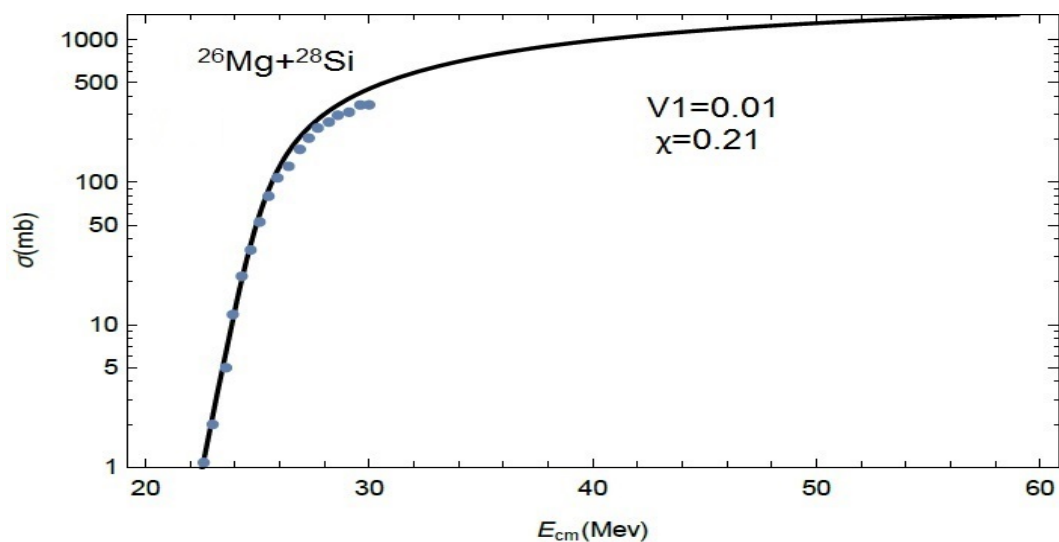
شکل ۲۱.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



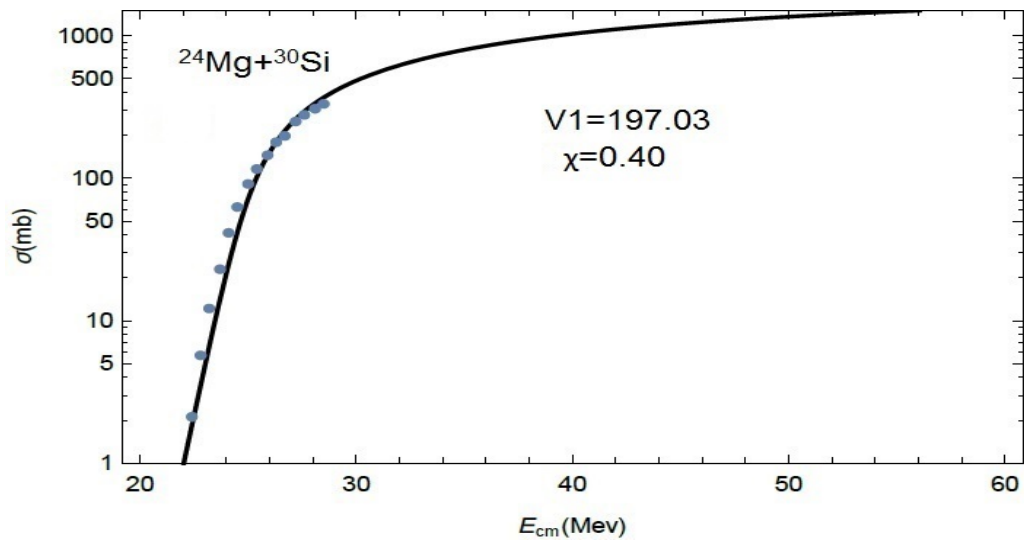
شکل ۲۲.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



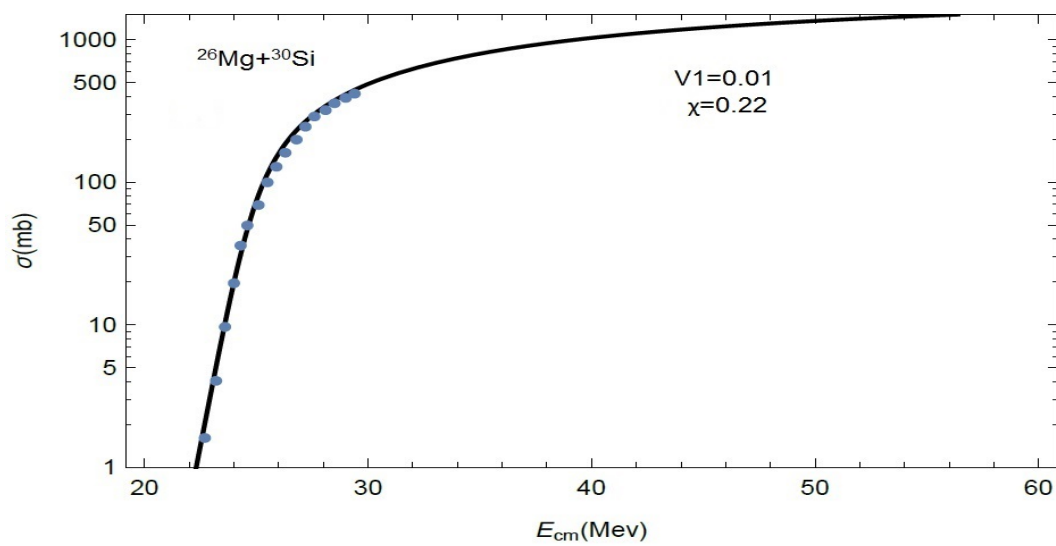
شکل ۲۳.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



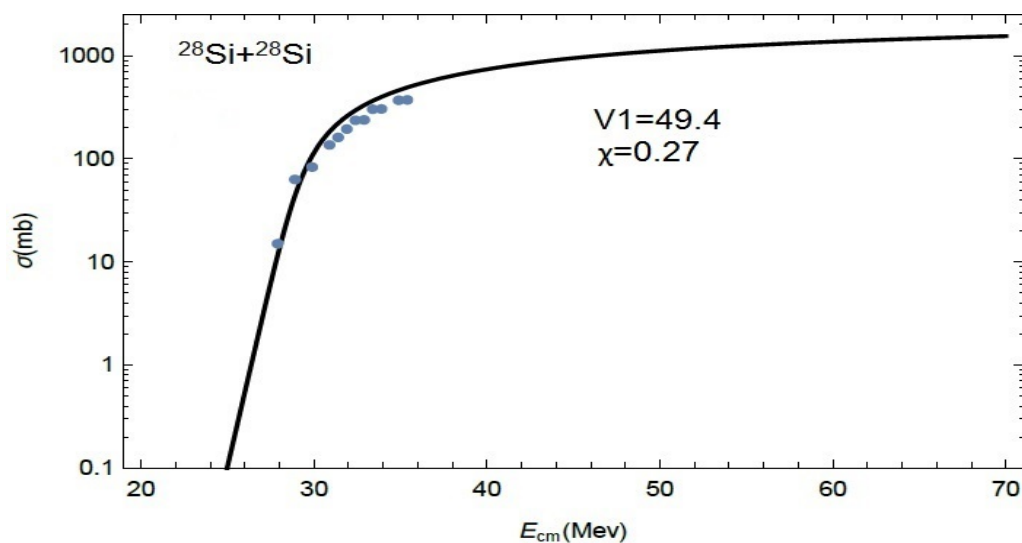
شکل ۲۴.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{26}\text{Mg} + ^{28}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



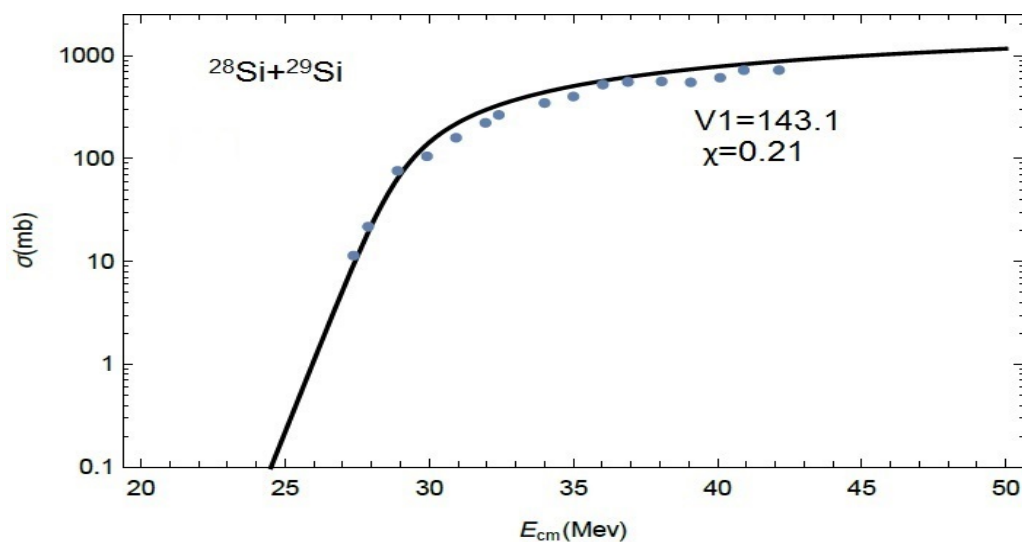
شکل ۲۵.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{30}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



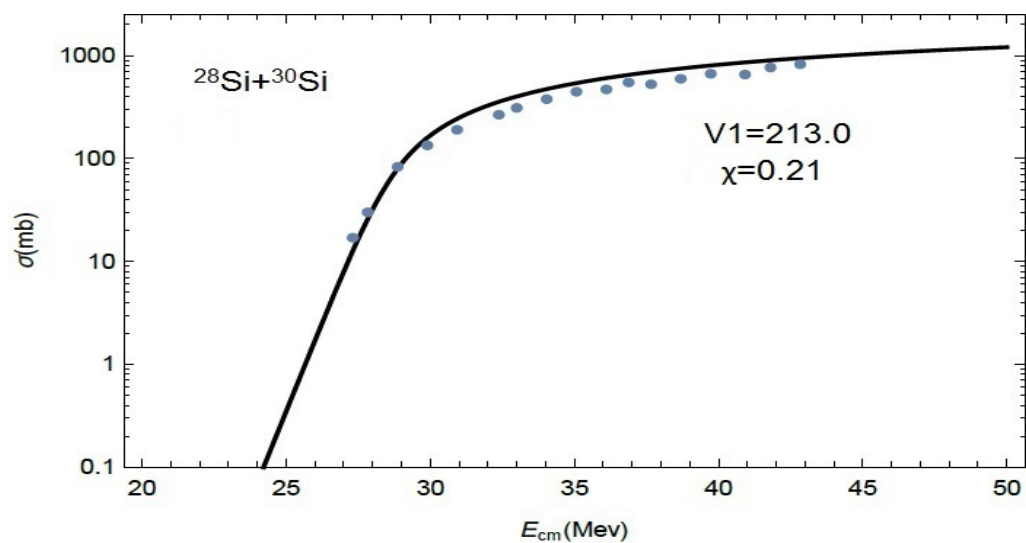
شکل ۲۶.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{26}\text{Mg} + ^{30}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



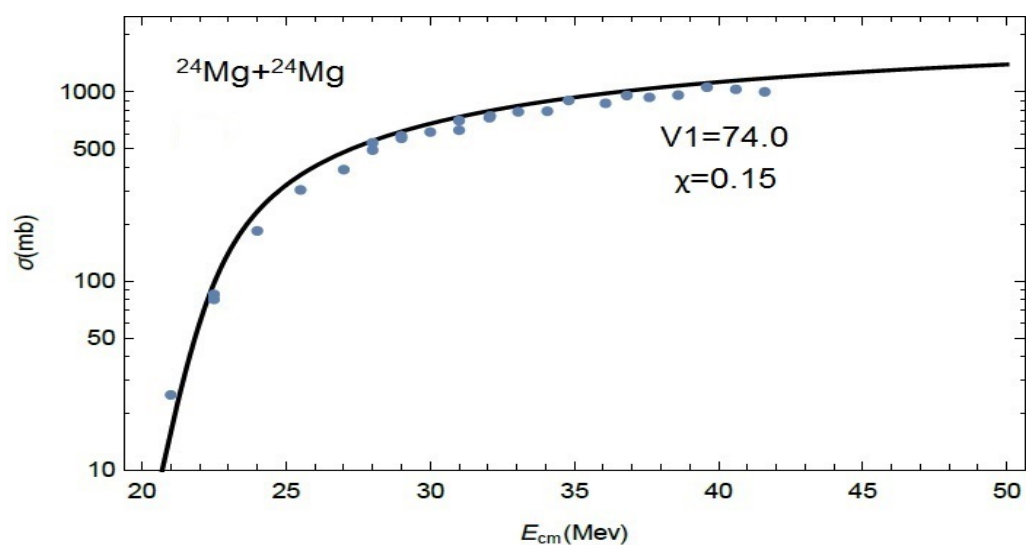
شکل ۲۷.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



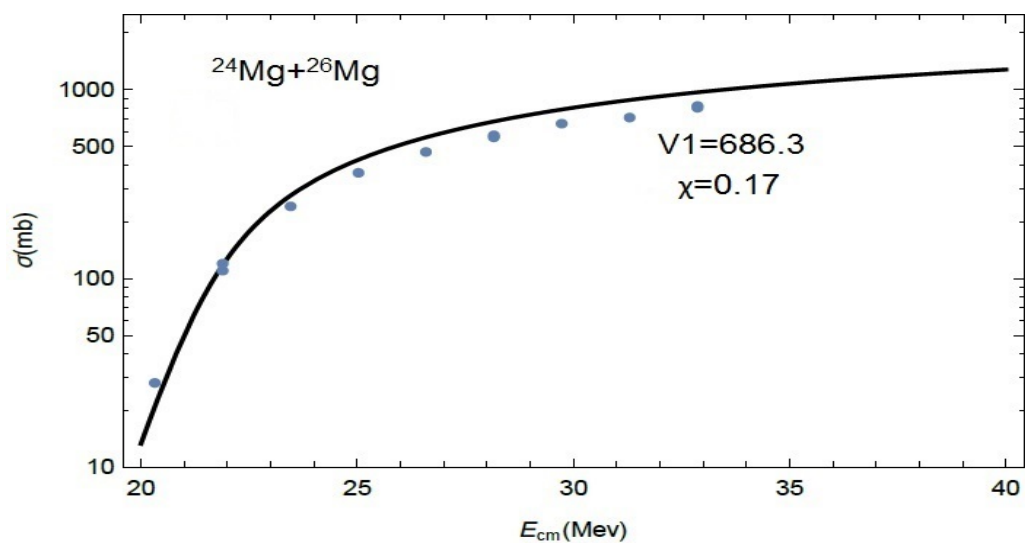
شکل ۲۸.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{29}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



شکل ۲۹.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{30}\text{Si}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



شکل ۳۰.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  $^{24}\text{Mg} + ^{24}\text{Mg}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$



شکل ۳۱.۴: سطح مقطع همجوشی برحسب تابعی از انرژی مرکزجرم برای واکنش  
 $^{24}\text{Mg} + ^{26}\text{Mg}$  به همراه میزان خطای برازش  $\chi$





# مراجع

- [۱] کرین ک ، ترجمه میرفخرایی ن . مدرس م ، (۱۳۷۳) ، آشنایی با فیزیک هسته‌ای جلد دوم ، چاپ اول ، مرکز نشر دانشگاهی تهران ، صفحه ۱۸۷
- [۲] می‌یرهوف و ، ترجمه رحیمی م ، (۱۳۷۹) ، مبانی فیزیک هسته‌ای چاپ پنجم ، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد ، صفحه ۵۸
- [3] Bernard L.C (1971), "Concept of Nuclear Physics", University of Pittsburgh,US. pp.392
- [4] Canto, L. F., Gomes, P. R. S., Donangelo, R., Lubian, J., Hussein, M. S. (2015), "Recent developments in fusion and direct reactions with weakly bound nuclei" **Physics Reports**,596, 1-86.
- [5] Back, B. B., Esbensen, H., Jiang, C. L., Rehm, K. E. (2014), "Recent developments in heavy-ion fusion reactions" **Reviews of Modern Physics**,86(1), 317.
- [6] Aguilera, E. F., Amador-Valenzuela, P., Martinez-Quiroz, E., Lizcano, D., Rosales, P., García-Martínez, H., Rogachev, G. (2011), "Near-Barrier Fusion of the B 8+ Ni 58 Proton-Halo System" **Physical review letters**,107(9), 092701.
- [7] Hu, S. P., Zhang, G. L., Yang, J. C., Zhang, H. Q., Gomes, P. R. S., Lubian, J., Li, C. B. (2015), "Small suppression of the complete fusion of the Li 6+ Zr 96 system at near-barrier energies" **Physical Review C**,91(4), 044619.
- [8] Guo, C. L., Zhang, G. L., Hu, S. P., Yang, J. C., Zhang, H. Q., Gomes, P. R. S., Zheng, Y. (2015), "Coupling effects on the fusion of Li 6+ Sm 154 at energies slightly above the Coulomb barrier" **Physical Review C**,92(1), 014615.
- [9] Dutt, I.,Puri, R. K. (2010), "Systematic study of the fusion barriers using different proximity-type potentials for N= Z colliding nuclei: New extensions" **Physical Review C**, 81(4), 044615.

- [10] Dutt, I., Puri, R. K. (2010), "Comparison of different proximity potentials for asymmetric colliding nuclei" **Physical Review C**, 81(6), 064609.
- [11] Dutt, I., Puri, R. K. (2010), "Role of surface energy coefficients and nuclear surface diffuseness in the fusion of heavy-ions" **Physical Review C**, 81(4), 047601.
- [12] Dutt, I., Bansal, R. (2010), "A Modified Proximity Approach in the Fusion of Heavy Ions" **Chinese Physics Letters**, 27(11), 112402.
- [13] Błocki, J., Randrup, J., Świątecki, W. J., Tsang, C. F. (1977), "Proximity forces" **Annals of Physics**, 105(2), 427-462.
- [14] Blocki, J., Świątecki, W. J. (1981), "A generalization of the proximity force theorem" **Annals of Physics**, 132(1), 53-65.
- [15] Reisdorf, W. (1994), "Heavy-ion reactions close to the Coulomb barrier" **Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics**, 20(9), 1297.
- [16] Myers, W. D., Świątecki, W. J. (2000), "Nucleus-nucleus proximity potential and super-heavy nuclei" **Physical Review C**, 62(4), 044610.
- [17] Zhang, G. L., Le, X. Y., Zhang, H. Q. (2009), "Calculation of  $\alpha$  preformation for nuclei near  $N=162$  and  $N=184$ " **Physical Review C**, 80(6), 064325.
- [18] Basu, D. N. (2003), "Role of effective interaction in nuclear disintegration processes" **Physics Letters B**, 566(1), 90-97.
- [19] Xu, C., Ren, Z. (2005), "Systematical calculation of  $\alpha$  decay half-lives by density-dependent cluster model" **Nuclear Physics A**, 753(1-2), 174-185.
- [20] Royer, G., Remaud, B. (1985), "Static and dynamic fusion barriers in heavy-ion reactions" **Nuclear Physics A**, 444(3), 477-497.
- [21] Royer, G., Gaudillot, J. (2011), "Rotating hyperdeformed states in light nuclear systems" **Physical Review C**, 84(4), 044602.
- [22] Moustabchir, R., Royer, G. (2001), "Analytic expressions for the proximity energy, the fusion process and the  $\alpha$  emission" **Nuclear Physics A**, 683(1-4), 266-278.
- [23] Yao, Y. J., Zhang, G. L., Qu, W. W., Qian, J. Q. (2015), "Comparative studies for different proximity potentials applied to  $\alpha$  decay" **The European Physical Journal A**, 51(9), 122.

- [24] Zhang, G. L., Yao, Y. J., Guo, M. F., Pan, M., Zhang, G. X., Liu, X. X. (2016), "Comparative studies for different proximity potentials applied to large cluster radioactivity of nuclei" **Nuclear Physics A**, 951, 86-96.
- [25] Shi, Y. J., Swiatecki, W. J. (1985), "Estimates of radioactive decay by the emission of nuclei heavier than  $\alpha$ -particles" **Nuclear Physics A**, 438(2), 450-460.
- [26] Malik, S. S., Gupta, R. K. (1989), "Theory of cluster radioactive decay and of cluster formation in nuclei" **Physical Review C**, 39(5), 1992.
- [27] Malik, S. S., Singh, S., Puri, R. K., Kumar, S., Gupta, R. K. (1989), "Clustering phenomena in radioactive and stable nuclei and in heavy-ion collisions" **Pramana**, 32(4), 419-433.
- [28] Dutt, I., Puri, R. K. (2010), "Analytical parametrization of fusion barriers using proximity potentials" **Physical Review C**, 81(6), 064608.
- [29] Dutt, I., Puri, R. K. (2010), "Comparison of different proximity potentials for asymmetric colliding nuclei" **Physical Review C**, 81(6), 064609.
- [30] Möller, P., Nix, J. R. (1981), "Nuclear mass formula with a Yukawa-plus-exponential macroscopic model and a folded-Yukawa single-particle potential" **Nuclear Physics A**, 361(1), 117-146.
- [31] Myers, W. D., Swiatecki, W. J. (1969), "Average nuclear properties" **Annals of Physics**, 55(3), 395-505.
- [32] Myers, W. D., Swiatecki, W. J. (1980), "Droplet-Model theory of the neutron skin" **Nuclear Physics A**, 336(2), 267-278.
- [33] Nerlo-Pomorska, B., Pomorski, K. (1994), "Simple formula for nuclear charge radius" **Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei**, 348(3), 169-172.
- [34] Royer, G., Rousseau, R. (2009), "On the liquid drop model mass formulae and charge radii" **The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei**, 42(3), 541-545
- [35] Bass, R. (1973), "Threshold and angular momentum limit in the complete fusion of heavy ions" **Physics Letters B**, 47(2), 139-142.
- [36] Bass, R. (1974), "Fusion of heavy nuclei in a classical model" **Nuclear Physics A**, 231(1), 45-63.

- [37] Bass, R. (1977), "Nucleus-nucleus potential deduced from experimental fusion cross sections" **Physical Review Letters**, 39(5), 265.
- [38] Christensen, P. R., Winther, A. (1976), "The evidence of the ion-ion potentials from heavy ion elastic scattering" **Physics Letters B**, 65(1), 19-22.
- [39] Winther, A. (1995), "Dissipation, polarization and fluctuation in grazing heavy-ion collisions and the boundary to the chaotic regime" **Nuclear Physics A**, 594(2), 203-245.
- [40] Ngô, C., Tamain, B., Beiner, M., Lombard, R. J., Mas, D., Deubler, H. H. (1975), "Properties of heavy ion interaction potentials calculated in the energy density formalism" **Nuclear Physics A**, 252(1), 237-252.
- [41] Ngô, H., Ngô, C. (1980), "Calculation of the real part of the interaction potential between two heavy ions in the sudden approximation" **Nuclear Physics A**, 348(1), 140-156.
- [42] Denisov, V. Y. (2002), "Interaction potential between heavy ions" **Physics Letters B**, 526(3), 315-321.
- [43] Zhang, G. L., Pan, M. (2016), "The parametrization of Coulomb barrier heights and positions using a new universal function in the proximity potential" **International Journal of Modern Physics E**, 25(10), 1650082.
- [44] Myers, W. D., Swiatecki, W. J. (1966), "Nuclear masses and deformations" **Nuclear Physics**, 81(1), 1-60.
- [45] Zhang, G. L., Zheng, H. B., Qu, W. W. (2013), "Study of the universal function of nuclear proximity potential between  $\alpha$  and nuclei from density-dependent nucleon-nucleon interaction" **The European Physical Journal A**, 49(1), 10.
- [46] Srivastava, D. K., Basu, D. N., Ganguly, N. K. (1983), "The density dependence and the range of effective projectile-nucleon interaction from optical model analysis" **Physics Letters B**, 124(1-2), 6-10.
- [47] Qu, W. W., Zhang, G. L., Le, X. Y. (2011), "The parametrization of Coulomb barrier heights and positions using the double folding model" **Nuclear Physics A**, 868, 1-11
- [48] Dutt, I., Puri, R. K. (2010), "Systematic study of the fusion barriers using different proximity-type potentials for  $N=Z$  colliding nuclei: New extensions" **Physical Review C**, 81(4), 044615.

- [49] Wong, C. Y. (1972), "Fusion threshold energy in heavy-ion reactions" **Physics Letters B**,42(2), 186-190.
- [50] Wong, C. (1973), "Interaction barrier in charged-particle nuclear reactions" **Physical Review Letters**31(12), 766.
- [51] Morsad, A., Kolata, J. J., Tighe, R. J., Kong, X. J., Aguilera, E. F., Vega, J. J. (1990), "Sub-barrier fusion of Si 28, 30 with Mg 24, 26" **Physical Review C**,41(3), 988.
- [52] Gary, S., Volant, C. (1982), "Fusion and compound nuclei decay for light and intermediate-mass systems: Mg 24, Si 28+ C 12, Mg 24+ Mg 24, 26, Si 28+ Mg 24, Si 28, 29, 30" **Physical Review C**,25(4), 1877.
- [53] Tomasi, E., Ardouin, D., Barreto, J., Bernard, V., Cauvin, B., Magnago, C., Ribrag, M. (1982) "Fusion excitation function of the 40Ca+ 40Ca system close to the threshold" **Nuclear Physics A**,373(2), 341-348.
- [54] Barreto, J., Auger, G., Langevin, M., Plagnol, E. (1983), "Fusion of the Ca 40+ Ca 40 system" **Physical Review C**,27(3), 1335.
- [55] Angeli, I. (2004), "A consistent set of nuclear rms charge radii: properties of the radius surface R (N, Z)" **Atomic data and nuclear data tables**,87(2), 185-206.
- [56] Myers, W. D., Swiatecki, W. J. (1967), "ANOMALIES IN NUCLEAR MASSES" **Ark. Fys**,36: 343-52.
- [57] Dutt, I. (2011), "The role of various parameters used in proximity potential in heavy-ion fusion reactions: New extension" **Pramana**,76(6), 921-931.
- [58] Möller, P., Nix, J. R. (1976), "Macroscopic potential-energy surfaces for symmetric fission and heavy-ion reactions" **Nuclear Physics A**,272(2), 502-532.
- [59] Krappe, H. J., Nix, J. R., Sierk, A. J. (1979), "Unified nuclear potential for heavy-ion elastic scattering, fusion, fission, and ground-state masses and deformations" **Physical Review C**,20(3), 992.
- [60] Royer, G., Remaud, B. (1984), "Fission processes through compact and creviced shapes" **Journal of Physics G: Nuclear Physics**,10(8), 1057.
- [61] Möller, P., Nix, J. R., Myers, W. D., Świątecki, W. J. (1995) "Nuclear ground-state masses and deformations" **Atomic data and nuclear data tables**,59(2), 185-381.

- 
- [62] Pomorski, K., Dudek, J. (2003), "Nuclear liquid-drop model and surface-curvature effects" **Physical Review C**,67(4), 044316.
- [63] Newton, J. O., Morton, C. R., Dasgupta, M., Leigh, J. R., Mein, J. C., Hinde, D. J., Hagino, K. (2001), "Experimental barrier distributions for the fusion of  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{28}\text{Si}$ , and  $^{35}\text{Cl}$  with  $^{92}\text{Zr}$  and coupled-channels analyses" **Physical Review C**,64(6), 064608.
- [64] Stefanini, A. M., Montagnoli, G., Silvestri, R., Corradi, L., Courtin, S., Fioretto, E., Scarlassara, F. (2009), "How does fusion hindrance show up in medium-light systems? The case of  $^{48}\text{Ca} + ^{48}\text{Ca}$ " **Physics Letters B**,679(2), 95-99.
- [65] Leigh, J. R., Dasgupta, M., Hinde, D. J., Mein, J. C., Morton, C. R., Lemmon, R. C., Rowley, N. (1995), "Barrier distributions from the fusion of oxygen ions with  $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{148}\text{Sm}$ ,  $^{154}\text{Sm}$  and  $^{186}\text{W}$ " **Physical Review C**,52(6), 3151.
- [66] Morton, C. R., Berriman, A. C., Dasgupta, M., Hinde, D. J., Newton, J. O., Hagino, K., Thompson, I. J. (1999), "Coupled-channels analysis of the  $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$  fusion barrier distribution" **Physical Review C**,60(4), 044608.
- [67] D.G. Kovar, Donald F. Geesaman, T.H. Braid, Y. Eisen, W. Henning, T.R. Ophel, M. Paul, K.E. Rehm, Stephen J. Sanders, P. Sperr et al.(1979), "Systematics of carbon- and oxygen-induced fusion on nuclei with  $12 \leq A \leq 19$ " **Physical Review C**,20(4),1305.

## **Abstract**

In this research, we have studied various proximity potentials in nuclear fusion reactions. We use from different models of proximity potentials for calculate barrier height and position and emphasized that the fusion cross-section is one of the most important quantities in the fusion process. We try by inserting correction models such as the Yukawa type potential, modified Woods-Saxon potential and using squares method, the error is minimized and it improves the calculations of the fusion cross-sections of the nuclei than the methods presented in this study. the two colliding nuclei assumed spherical. In the fusion of deformed nuclei, the interaction potential affects the nucleus deformation and relative orientation of the nuclei.

**Keyword:** Barrier height; Position Barrier; Cross-Section Fusion; Yukawa type potential; modified Woods-Saxon





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Physics and Nuclear Engineering**

**MSc Thesis in: Nuclear Physics**

**The consideration of proximity potentials in  
nuclear fusion reactions**

**By: Afiye Avar**

**Supervisors**

**Dr. Hassan Hassanabadi**

**Dr. Somaye Hassanabadi**

**June 2018**