



رفتار ارتفاع سد پتانسیل در واکنش همجوشی یون‌های سنگین

مهرداد دوانلو، امید ناصر قدسی، سید محمد متولی*

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، صندوق پستی: ۴۱۶-۴۷۴۱۵، بابلسر - ایران

*Email: motavalli@umz.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۶

چکیده

با توجه به اهمیت عدم تقارن ماده هسته‌ای بر روی برهم‌کنش یون‌های سنگین، در این تحقیق سیستم‌های برهم‌کنشی را به سه دسته مختلف ایزوتوپی، ایزوباری و ایزوتونی تقسیم و مشخصات سد همجوشی را برای هر گروه به صورت مجزا با استفاده از ۲۷ نسخه مختلف فرمالیزم مجاورتی مورد بررسی قرار داده‌ایم. بررسی انجام شده نشان می‌دهد، جهت محاسبه و هم‌چنین پیش‌بینی مشخصات سد همجوشی برهم‌کنش یون‌های سنگین مناسب‌تر است به جای استفاده از یک نسخه منفرد، از نسخه‌های مختلف فرمالیزم مجاورتی برحسب درجات آزادی مختلف ایزواسپینی استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: سد همجوشی، مدل مجاورتی، تقارن ایزواسپین، برهم‌کنش یون‌های سنگین، عدم تقارن هسته

Behavior of potential barrier height in heavy ion fusion reactions

M. Davanlou, O.N. Ghodsi, S.M. Motevalli*

Department of Nuclear Physics, Faculty of Sciences, University of Mazandaran, P.O.Box: 47415-416, Babolsar - Iran

Research Article

Received 28.4.2021, Accepted 17.7.2021

Abstract

Considering the importance of nuclear asymmetry matter in heavy-ion interactions, in the present study, we have divided the interacting systems into three different groups, including isotopic, isobaric, and isotonic systems, and examined the characteristics of the fusion barrier for each group separately using 27 different versions of proximity formalism. Our results show that for calculating and predicting the fusion barrier characteristics in heavy ions interactions, it is more proper to use different versions of proximity formalism, instead of a single performance, based on the isospin degrees of freedom.

Keywords: Fusion barrier, Proximity model, Isospin symmetry, Heavy ions interactions, Nucleus asymmetry



۱. مقدمه

هدف اصلی در این تحقیقات ارائه مناسب‌ترین نسخه پتانسیل مجاورتی به گونه‌ای است که بتواند مشخصات سد همجوشی را در بازه گسترده‌ای از عدد جرمی برای هسته‌های پرتابه و هدف در بهترین توافق با داده‌های تجربی تولید کند [۱۲، ۱۳]. این نسخه‌ها از پتانسیل مجاورتی جهت پیش‌بینی مقادیر ارتفاع سد و سطح مقطع همجوشی سیستم‌های برهم‌کنشی بسیار مفید می‌باشند.

ضریب کشش سطحی یکی از مهم‌ترین پارامترهای فرمالیزم مجاورت است که مقدار آن به عدد جرمی و اتمی هسته‌های برخوردکننده وابسته است. به همین جهت با استفاده از این فرمالیزم تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص تأثیر تقارن‌های ایزواسپینی بر روی مشخصات سد همجوشی انجام گرفته است. پژوهش‌های انجام گرفته بر روی هسته‌های برخوردکننده متقارن و نامتقارن اهمیت این درجات آزادی را بر روی مشخصات سد همجوشی نشان می‌دهند، هم‌چنین بررسی سیستم‌های ایزوتوپیکی یک وابستگی خطی بین سطح مقطع همجوشی و پارامتر N/Z نشان می‌دهد [۶]. Z و N به ترتیب عدد نوترونی و اتمی هسته مرکب می‌باشند.

اکثر نسخه‌های پتانسیل مجاورتی که تاکنون ارائه شده‌اند، مشخصات سد همجوشی را برای گروهی از سیستم‌های برهم‌کنشی مطابق با داده‌های تجربی باز تولید می‌کنند، اما هیچ یک از این مدل‌ها قادر به توصیف هم‌زمان این مشخصات برای کلیه واکنش‌هایی که تاکنون مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند نیستند. از این‌رو در این تحقیق به جای بررسی داده‌های تجربی سد همجوشی برای کلیه واکنش‌ها، این کمیت را در بازه‌های متفاوت عدد جرمی مورد مطالعه قرار داده‌ایم. هم‌چنین با توجه به اهمیت تقارن‌های ایزواسپینی بر روی مشخصات نظری واکنش‌های همجوشی، مشخصات تجربی سد همجوشی برای تعداد ۲۷۰ واکنش را با تقسیم‌بندی به سه دسته ایزوباری، ایزوتوپی و ایزوتونی در بازه‌های متفاوت جرمی توسط ۲۷ نسخه مختلف پتانسیل مجاورتی به صورت سیستماتیک مورد مطالعه قرار داده‌ایم. در این پژوهش، از اثرات تغییر شکل هسته صرف نظر شده است.

۲. نظریه پتانسیل برهم‌کنشی

پتانسیل برهم‌کنشی کل، $V_N(r)$ ، بین هسته‌های هدف و پرتابه یکی از مهم‌ترین فاکتورها در توصیف واکنش واپاشی می‌باشد. این پتانسیل شامل دو قسمت جاذبه‌ی هسته‌ای کوتاه برد $V_N(r)$ و دافعه‌ی کولنی بلندبرد به فرم رابطه (۱) می‌باشد:

$$V_T(r) = V_N(r) + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (1)$$

مطالعه واکنش همجوشی یون‌های سنگین یکی از پدیده‌های مورد توجه محققین در چند دهه‌ی اخیر می‌باشد. برخی از این مطالعات متوجه بررسی ویژگی‌های فرایند نزدیک شدن دو هسته‌ی هدف و پرتابه و هم‌چنین پدیدار شدن برهم‌کنش میان آن‌ها به صورت واکنش همجوشی می‌باشد. فرایند تشکیل هسته مرکب به مجموع برهم‌کنش‌های بین نوکلئون‌های هسته هدف و پرتابه وابسته است. البته از نقطه نظر آزمایشگاهی وقوع واکنش همجوشی تنها کانال موجود برای هسته‌های برخوردکننده نمی‌باشد. به طور کلی رخداد کانال‌هایی نظیر شبه شکافت و پراکندگی در قبل از هم‌پوشانی کامل دو هسته، از جمله مواردی است که در رقابت با کانال همجوشی کامل هسته‌های هدف و پرتابه حایز اهمیت است. سطح مقطع‌های همجوشی به همراه متوسط تکانه زاویه‌ای کمیت‌هایی هستند که به صورت تجربی برای این نوع واکنش‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشند. یکی از کمیت‌هایی که با استفاده از داده‌های سطح مقطع تجربی همجوشی استخراج می‌شود کمیت توزیع سد می‌باشد. رفتار وابسته به انرژی این کمیت منجر به اندازه‌گیری ارتفاع سد همجوشی می‌گردد [۱]. با توجه به استخراج ارتفاع سد با استفاده از داده‌های تجربی سطح مقطع به این کمیت ارتفاع سد تجربی نیز گفته می‌شود. بر این اساس یکی از موارد مورد توجه در مطالعات برهم‌کنش یون‌های سنگین، بررسی مشخصات سد همجوشی می‌باشد و تاکنون تلاش‌های زیادی برای پارامترسازی این کمیت انجام شده است [۷-۱]. عموماً از اهداف این پارامترسازی‌ها ارائه عبارتی مناسب جهت پیش‌بینی مقادیر سد پتانسیل در کل محدوده‌ی جرمی می‌باشد. استفاده از روابط پارامترسازی شده برای سد پتانسیل، مسیر را برای طراحی آزمایش‌های جدید و رسیدن به تخمین‌های دقیق‌تر از سطح مقطع همجوشی، هموارتر می‌سازد.

پتانسیل کل در فرایند همجوشی از دو بخش دافعه کولنی و جاذبه هسته‌ای تشکیل شده است که عموماً ارتفاع سد پتانسیل در فواصلی که سطح دو هسته در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند تشکیل می‌شود. با توجه به این‌که بخش‌های کولنی و هسته‌ای پتانسیل برهم‌کنشی به مقادیر نوترون و پروتون‌های برهم‌کنشی وابسته است، از این‌رو پارامترسازی ارتفاع سد پتانسیل معمولاً برحسب کمیت‌هایی وابسته به عدد جرمی و عدد اتمی انجام می‌گیرد [۷-۱۰]. یکی از فرمالیزم‌هایی که برای محاسبه بخش هسته‌ای پتانسیل کل به صورت گسترده‌ای استفاده شده است پتانسیل مجاورتی می‌باشد [۱۱]. پارامترسازی مشخصات سد همجوشی با استفاده از این فرمالیزم یکی از موارد مطالعاتی مورد توجه در سال‌های اخیر بوده است.



دارای فرم پتانسیل وودز- سکسونی جهت محاسبه پتانسیل هسته‌ای می‌باشد، جزییات ریاضی این نسخه در مرجع ۳۰ معرفی شده‌اند.

۳. محاسبات و نتایج

یکی از کمیت‌های مهم در مطالعات برهم‌کنش یون‌های سنگین مقادیر سد همجوشی می‌باشد، که این کمیت در محاسبه سطح مقطع همجوشی به ویژه در انرژی‌های بزرگ‌تر از ارتفاع سد همجوشی بسیار تأثیرگذار است. از این‌رو مدلی که قادر به محاسبه مقادیر این کمیت در بهترین توافق با داده‌های آزمایشگاهی باشد از دیدگاه نظری مدلی کارآمدتر خواهد بود. به همین جهت در ابتدا با استفاده از مقادیر تجربی مشخصات سد همجوشی ۲۷۰ واکنش مورد نظر، ارتفاع سد همجوشی را به صورت منظم و هدفمند با استفاده از ۲۷ نسخه فرمالیزم مجاورتی مورد مطالعه قرار داده‌ایم. برای یافتن بهترین نسخه تقریبی مقادیر خطای نسبی را با استفاده از رابطه (۷)،

$$X^{\%} = \sqrt{\frac{1}{N_{\gamma}} \sum_i \left(\frac{V_i^{The.} - V_i^{Exp.}}{V_i^{The.} + V_i^{Exp.}} \right)^2} \quad (7)$$

برای هر یک از این نسخه‌ها محاسبه نموده‌ایم. در این رابطه $V_{Exp.}$ و $V_{The.}$ به ترتیب مقادیر تئوری و تجربی سد همجوشی می‌باشند و N_{γ} تعداد کل سیستم‌های مورد مطالعه می‌باشند. نتایج حاصل محاسبات در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. ضرایب γ_0 و K_s برای نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورتی

γ -set	$\gamma_0 [\frac{\text{MeV}}{\text{fm}^2}]$	K_s	Ref.
γ -MS ۱۹۶۷	۰٫۹۵۱۷	۱٫۷۸۲۶	[۱۴]
γ -Ms ۱۹۶۶	۱٫۰۱۷۳۴	۱٫۷۹	[۱۵]
γ -MN ۱۹۷۶	۱٫۴۶۰۷۳۴	۴٫۰	[۱۶]
γ -KNS ۱۹۷۹	۱٫۲۴۰۲	۳٫۰	[۱۷]
γ -MN-I ۱۹۸۱	۱٫۱۷۵۴	۲٫۲	[۱۸]
γ -MN-II ۱۹۸۱	۱٫۲۷۳۲۶	۲٫۵	[۱۸]
γ -MN-III ۱۹۸۱	۱٫۲۵۰۲	۲٫۴	[۱۸]
γ -RR ۱۹۸۴	۰٫۹۵۱۷	۲٫۶	[۱۹]
γ -MN ۱۹۸۸	۱٫۲۴۹۶	۲٫۳	[۲۰]
γ -MN ۱۹۹۵	۱٫۲۵۲۸۴	۲٫۳۴۵	[۲۱]
γ -PD-LDM ۲۰۰۳	۱٫۰۸۹۴۸	۱٫۹۸۳۰	[۲۲]
γ -PD-NLD ۲۰۰۳	۰٫۹۱۸۰	۰٫۷۵۴۶	[۲۲]
γ -PD-LSD ۲۰۰۳	۰٫۹۱۱۴۴۵	۲٫۲۹۳۸	[۲۲]

یکی از بخش‌های مهم در این پتانسیل، بخش برهم‌کنش هسته‌ای است، که در این کار تحقیقاتی از فرمالیزم مجاورتی برای محاسبه آن استفاده نموده‌ایم [۱۱]. در این فرمالیزم پتانسیل هسته‌ای با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$V_N(r) = 4\pi\gamma b \bar{R} \phi(\xi) \quad (2)$$

که در آن γ ضریب کشش سطحی و پارامتری تأثیرگذار در فرمالیزم پتانسیل مجاورتی می‌باشد. این ضریب از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$\gamma = \gamma_0 [1 - k_s A_s^{\frac{1}{3}}] \quad (3)$$

در این رابطه، $A_s = \frac{(N-Z)}{(N+Z)}$ ، N و Z به ترتیب عدد نوترونی و اتمی هسته مرکب می‌باشند. همچنین k_s و γ_0 به ترتیب پارامترهای عدم تقارن و ضریب کشش سطحی می‌باشند. میانگین شعاع انحنا، \bar{R} ، از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\bar{R} = \frac{(c_1 c_2)}{(c_1 + c_2)} \quad (4)$$

که C_i شعاع مؤثر هسته‌های پرتابه و هدف می‌باشد:

$$C_i = R_i \left[1 - \left(\frac{b}{R_i} \right)^2 \right], (i = 1, 2) \quad (5)$$

در این رابطه:

$$R_i = 1,28 A_i^{\frac{1}{3}} - 0,76 + 0,8 A_i^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

و A_i عدد جرمی می‌باشد. در رابطه (۲)، b پارامتر انحنا سطحی است و مقدار آن ۱ fm اختیار می‌شود. همچنین $\phi(\xi)$ تابع جهانی نامیده می‌شود. در این تابع پارامتر ξ برابر S/b است و S فاصله بین سطوح دو هسته برخوردی می‌باشد [۱۰].

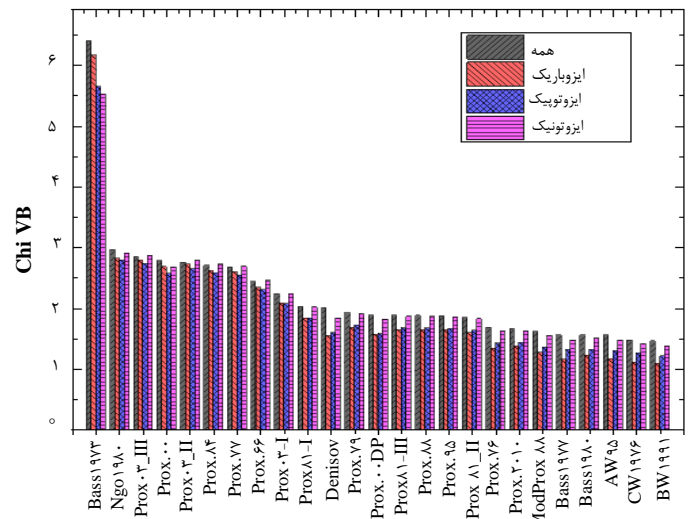
از پارامترهای مهم در فرمالیزم مجاورتی، پارامترهای عدم تقارن و ضریب کشش سطحی می‌باشند که تاکنون مقادیر مختلفی برای این پارامترها پیشنهاد شده است. مقادیر این پارامترها برای نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورت در جدول ۱ لیست شده‌اند. سایر نسخه‌های پتانسیل مجاورت شامل BW۱۹۹۱، CW۷۶، prox۲۰۱۰، prox00DP، prox۸۱، AW۹۵، Denisov، Ngo۱۹۸۰، Dutt۲۰۱۱ و نسخه‌های مختلف Bass شامل ۷۳، ۷۸ و ۸۰ می‌باشند که در مراجع [۱۴-۳۲] معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است نسخه BW۱۹۹۱



جدول ۲. مقادیر خطای نسبی نسخه‌های مختلف مجاورتی در پیش‌بینی مقادیر سد همجوشی برای واکنش‌های مختلف در دو بازه $Z_1 Z_2 > 1000$ و $Z_1 Z_2 < 1000$

مدل مجاورت	همه-سیستم	$Z_1 Z_2 < 1000$	$Z_1 Z_2 > 1000$
Prox.۷۷	۲,۳۰۲۴	۲,۳۱۰۸	۲,۲۴۰۲
Prox.۶۶	۲,۱۰۵۳	۲,۱۱۳۷	۲,۰۴۳۱
Prox.۷۶	۱,۵۸۵۸	۱,۶۱۰۱	۱,۳۹۴۸
Prox.۷۹	۱,۷۰۳۲	۱,۷۱۰۰	۱,۶۵۲۴
Prox.۸۱-I	۱,۷۷۱۹	۱,۷۸۰۹	۱,۷۰۴۵
Prox.۸۱-II	۱,۶۵۰۰	۱,۶۶۳۴	۱,۵۴۷۸
Prox.۸۱-III	۱,۶۷۲۶	۱,۶۸۴۹	۱,۵۷۹۵
Prox.۸۴	۲,۷۱۳۳	۲,۳۳۷۵	۱,۹۷۴۸۷
Prox.۸۸	۱,۶۷۰۴	۱,۶۸۳۳	۱,۵۷۱۸
Prox.۹۵	۱,۶۶۷۹	۱,۶۸۰۸	۱,۵۷۰۰
Prox.۰۳-I	۱,۹۳۲۳	۱,۹۳۹۸	۱,۸۷۵۸
Prox.۰۳-II	۲,۳۷۴۱	۲,۳۹۲۶	۲,۲۳۳۷
Prox.۰۳-III	۲,۸۵۴۹	۲,۴۶۵۵	۱,۹۷۶۰۸
ModProx.۸۸	۱,۶۳۵۴	۱,۶۹۱۲	۱,۱۴۵۸
Prox.۲۰۱۰	۱,۸۱۳۲	۱,۸۳۱۰	۱,۶۷۶۹
Prox.۰۰	۲,۷۸۱۷	۲,۸۳۲۲	۲,۳۷۸۳
Prox.۰۰DP	۱,۸۹۰۱	۱,۸۹۵۸	۱,۸۴۷۴
Bass.۱۹۷۳	۶,۴۲۰۴	۶,۶۹۲۹	۳,۸۷۰۴
Bass.۱۹۷۷	۱,۵۶۵۳	۱,۵۶۵۳	۱,۴۴۹۲
Bass.۱۹۸۰	۱,۵۶۲۷	۱,۶۰۷۳	۱,۱۸۴۲
CW.۱۹۷۶	۱,۴۷۶۷	۱,۵۱۵۷	۱,۱۵۱۲
BW.۱۹۹۱	۱,۴۶۲۵	۱,۴۹۷۷	۱,۱۷۲۰
Ngo.۱۹۸۰	۲,۹۷۱۴	۲,۹۴۵۶	۳,۱۵۴۰
Denisov	۲,۰۱۲۷	۱,۹۹۰۴	۲,۱۶۹۹
Denisov-DP	۲,۸۴۳۸	۲,۹۶۸۷	۱,۶۶۰۵
AW.۹۵	۱,۵۵۶۴	۱,۵۶۷۵	۱,۴۷۲۲
Dutt.۲۰۱۱	۱,۷۴۳۵	۱,۷۷۵۱	۱,۴۹۱۱

از آنجایی که فرایند همجوشی در ناحیه‌ای که چگالی دو هسته برهم‌کنشی در برد نیروهای هسته‌ای قرار گرفته و شروع به هم‌پوشانی می‌کنند، رخ می‌دهد، لذا دنباله بخش پتانسیل هسته‌ای در شکل‌گیری پتانسیل کل بیش‌ترین سهم را داشته و این بخش از پتانسیل نقش مؤثرتری را در مطالعات نظری واکنش‌های همجوشی در مقایسه با بخش داخلی پتانسیل دارد. از این‌رو در شکل‌گیری پتانسیل بین دو هسته بیش‌ترین تأثیر را نوکلئون‌های سطحی دارند، لذا یکی از کمیت‌های مؤثر در شکل‌گیری پتانسیل هسته‌ای تقارن‌های ایزواسپینی است. از این‌رو در ادامه این تحقیق، واکنش‌های انتخابی را در سه دسته تقارنی ایزوباریک، ایزوتوپیک و ایزوتونیک دسته‌بندی نموده‌ایم. در هر یک از این دسته‌بندی‌ها به ترتیب مجموعه‌ای از واکنش‌ها انتخاب شده‌اند که مقادیر Z ، N و A هسته مرکب متناظر با هر گروه از واکنش‌ها مقدار ثابتی داشته باشد. مقادیر Z ، N و A به ترتیب عدد اتمی، عدد نوترونی و عدد جرمی هسته مرکب می‌باشند مقادیر تجربی سد همجوشی از مراجع [۱، ۲، ۱۵] و



شکل ۱. مقادیر خطای نسبی حاصل از مطالعه مقادیر تجربی ارتفاع سد همجوشی توسط نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورتی برای تمام واکنش‌های انتخابی و واکنش‌ها در حالت‌های ایزوباریک، ایزوتوپیک و ایزوتونیک برای هسته مرکب.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نسخه BW.۱۹۹۱ در مقایسه با سایر نسخه‌های پتانسیل مجاورت دارای کم‌ترین خطای نسبی است. در این تحقیق، به این موضوع پرداخته شده است که نسخه‌ای که دارای کمینه خطای نسبی است، آیا مقادیر سد همجوشی را برای همه گروه‌های واکنشی در بهترین توافق پیش‌بینی می‌کند و یا این فرمالیزم انتخابی، به علت پیش‌بینی بسیار خوب مقادیر سد همجوشی برای برخی از واکنش‌ها، خطای نسبی برای آن کمینه گردیده است. در این صورت می‌توان انتظار داشت به جای یک مدل، مدل‌های مختلف مقادیر سد همجوشی را برای گروه‌های واکنشی متفاوت با کم‌ترین خطای پیش‌بینی کنند. برای بررسی دقیق‌تر خطای نسبی بین مدل‌های مختلف در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. به عنوان نمونه مقادیر خطای نسبی برای دو نسخه BW.۱۹۹۱ و Denisov به ترتیب برابر ۱,۴۶۲۵ و ۲,۰۱۲۷ می‌باشند، اختلاف مقادیر خطای نسبی بین این دو مدل قابل ملاحظه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمده اختلاف پیش‌بینی این دو مدل برای واکنش‌های در محدوده $Z_1 Z_2 > 1000$ می‌باشد، که Z_1 و Z_2 به ترتیب عدد اتمی هسته هدف و پرتابه می‌باشند. بررسی که انجام گرفته نشان می‌دهد، این مطلب برای اکثر مدل‌ها برقرار است. از این‌رو مقادیر ارتفاع سد همجوشی برای تمام واکنش‌های انتخابی با تقسیم‌بندی به دو بازه $Z_1 Z_2 > 1000$ و $Z_1 Z_2 < 1000$ توسط نسخه‌های مختلف فرمالیزم مجاورتی به صورت سیستماتیک بررسی کرده‌ایم. همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، در بازه‌های $Z_1 Z_2 < 1000$ و $Z_1 Z_2 > 1000$ به ترتیب مدل‌های BW.۱۹۹۱ و ModProx.۸۸ دارای کم‌ترین خطای نسبی می‌باشند.



در جدول ۳ ارایه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در $A < 30$ و $300 < A < 100$ به ترتیب خطای نسبی نسخه‌های Prox.00DP و ModProx88 از نسخه BW1991 کم‌تر می‌باشند.

به طور مشابه پیش‌بینی سایر مدل‌ها برای واکنش‌های انتخابی با تقارن ایزوتوپی و ایزوتونی در جدول‌های ۴ و ۵ مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند، نسخه‌های ModProx88 و Bass1980 در بازه $71 < Z < 112$ و نسخه CW1976 در بازه $50 < Z < 70$ دارای خطای نسبی کم‌تری در مقایسه با نسخه BW1991 برای واکنش‌های با تقارن ایزوتوپی می‌باشند. برای واکنش‌های با تقارن ایزوتونی نسخه‌های Bass1980 و CW1976 به ترتیب در بازه‌های $100 < N$ و $40 < N < 100$ دارای خطای نسبی کم‌تری در مقایسه با نسخه BW1991 می‌باشند.

مراجعه داخل آن‌ها استخراج شده است. در ابتدا کلیه واکنش‌های انتخابی در هر گروه تقارنی را با استفاده از مدل‌های مختلفی مجاورتی به صورت مجزا مورد بررسی قرار داده‌ایم. خطای نسبی هر یک از این مدل‌ها با استفاده از رابطه (۱) برای هر یک از مجموعه واکنش‌های ایزوباریک، ایزوتوپیک و ایزوتونیک در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودار مشاهده می‌شود، خطای نسبی به‌دست آمده از پتانسیل BW1991 برای تمام این گروه‌ها هم‌چنان از سایر نیروهای انتخابی کم‌تر می‌باشد.

در ادامه، کلیه مدل‌های مجاورتی انتخابی را در پیش‌بینی مشخصات سد همجوشی برای واکنش‌های انتخابی در گروه تقارنی ایزوباری را با جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار داده‌ایم. برای این منظور خطای نسبی مدل‌های انتخابی را در بازه‌های مختلف عدد جرمی محاسبه نموده‌ایم. نتایج حاصل از محاسبات

جدول ۳. مقادیر خطای نسبی نسخه‌های مختلف مجاورتی در پیش‌بینی مقادیر سد همجوشی واکنش‌های انتخابی با تقارن ایزوباری. خطای نسبی محاسبه شده برای ۱۴ واکنش انتخابی جدول ۲ در ستون دوم ارایه شده است. تعداد کل واکنش‌ها در هر بازه انتخابی داخل پرانتز نشان داده شده‌اند

مدل‌های مجاورت	تمامی سیستم‌های ایزوباریک (۱۴۶)	$A \leq 30$ (۱۳)	$30 < A \leq 60$ (۳۱)	$60 < A \leq 100$ (۴۷)	$100 < A \leq 200$ (۴۱)	$200 < A$ (۱۴)
Prox.۷۷	۲,۲۰۹۷	۲,۲۴۶۰	۲,۱۶۵۳	۲,۳۲۵۸	۲,۱۴۳۵	۲,۰۵۱۴
Prox.۶۶	۱,۹۸۸۵	۱,۹۶۱۷	۱,۹۷۹۸	۲,۱۰۶۳	۱,۹۰۹۳	۱,۸۳۴۲
Prox.۷۶	۱,۳۳۱۳	۱,۲۸۹۴	۱,۷۳۷۲	۱,۳۲۵۵	۰,۸۸۵۳	۱,۰۵۲۲
Prox.۷۹	۱,۴۹۸۳	۱,۳۴۴۰	۱,۶۶۳۲	۱,۵۷۴۳	۱,۳۱۳۰	۱,۳۷۹۲
Prox81-I	۱,۵۹۳۳	۱,۴۶۰۹	۱,۷۰۷۷	۱,۶۹۲۸	۱,۴۴۲۴	۱,۴۴۱۳
Prox81-II	۱,۴۳۷۶	۱,۲۹۳۷	۱,۶۵۴۴	۱,۵۱۲۵	۱,۲۰۴۰	۱,۲۴۸۸
Prox81-III	۱,۴۶۷۷	۱,۳۲۲۴	۱,۶۵۹۹	۱,۵۴۹۷	۱,۲۵۵۶	۱,۲۸۸۳
Prox.۸۴	۲,۲۳۷۸	۲,۲۵۶۶	۲,۱۶۷۵	۲,۳۴۱۵	۲,۱۹۳۱	۲,۱۶۰۳
Prox.۸۸	۱,۴۶۶۲	۱,۳۲۲۲	۱,۶۶۰۲	۱,۵۴۹۶	۱,۲۵۱۹	۱,۲۷۸۶
Prox.۹۵	۱,۴۶۲۵	۱,۳۱۸۱	۱,۶۵۹۱	۱,۵۴۴۵	۱,۲۴۶۱	۱,۲۷۶۴
Prox.۰۳-I	۱,۷۸۶۹	۱,۷۰۰۷	۱,۸۲۵۷	۱,۸۹۹۳	۱,۶۸۴۵	۱,۶۴۳۴
Prox.۰۳-II	۲,۳۰۱۸	۲,۳۹۵۱	۲,۲۷۴۶	۲,۴۲۹۶	۲,۲۱۱۲	۲,۰۴۲۲
Prox.۰۳-III	۲,۳۷۴۹	۲,۴۴۷۶	۲,۳۰۲۲	۲,۴۸۴۶	۲,۳۲۹۳	۲,۲۶۹۹
ModProx88	۱,۳۹۰۷	۱,۵۵۰۷	۱,۹۷۸۲	۱,۳۲۸۱	۰,۶۴۱۹	۰,۷۰۲۴
Prox.۲۰۱۰	۱,۴۷۵۶	۱,۳۳۴۶	۱,۷۳۴۴	۱,۵۱۶۰	۱,۲۳۶۱	۱,۲۹۶۳
Prox.00	۲,۷۴۹۲	۴,۰۱۷۹	۲,۷۴۸۴	۲,۵۰۷۴	۲,۴۲۰۵	۲,۴۱۸۲
Pro.00DP	۱,۶۰۲۹	۱,۲۱۲۹	۱,۷۸۵۶	۱,۷۰۷۰	۱,۴۷۲۶	۱,۴۵۷۶
Bass1973	۶,۲۶۶۶	۱۳,۳۶۱	۷,۶۷۵۳	۳,۱۹۲۷	۱,۷۸۳۳	۲,۸۱۲۴
Bass1977	۱,۳۴۷۳	۱,۴۱۹۴	۱,۷۳۱۹	۱,۳۱۹۹	۰,۸۱۹۱	۱,۲۱۷۹
Bass1980	۱,۳۱۶۹	۱,۳۲۹۰	۱,۸۱۵۲	۱,۳۲۴۳	۰,۷۲۴۹	۰,۷۰۹۷
CW1976	۱,۲۸۴۷	۱,۴۷۸۵	۱,۷۱۹۳	۱,۲۹۴۴	۰,۶۷۲۷	۰,۷۹۶۴
BW1991	۱,۲۷۰۹	۱,۶۰۳۴	۱,۶۲۰۷	۱,۲۷۵۵	۰,۶۶۵۱	۰,۸۳۴۲
Ngo1980	۲,۸۹۱۵	۳,۳۳۷۹	۲,۵۶۲۶	۲,۹۳۴۷	۲,۹۳۰۰	۲,۸۹۲۱
Denisov	۱,۶۳۱۲	۱,۷۷۵۵	۱,۹۰۹۰	۱,۵۳۳۱	۱,۳۷۷۸	۱,۵۱۶۶
Den-DP	۲,۴۴۰۷	۴,۵۹۶۱	۲,۹۷۰۹	۱,۷۳۲۴	۱,۲۲۶۳	۱,۰۶۷۴
AW95	۱,۳۲۶۳	۱,۴۴۶۴	۱,۶۸۶۳	۱,۳۲۸۲	۰,۸۲۸۴	۱,۰۴۵۲
Dutt2011	۱,۵۷۱۵	۱,۶۲۰۷	۱,۷۷۱۴	۱,۶۳۵۴	۱,۲۶۲۷	۱,۳۸۸۸



در این تحقیق، برای به دست آوردن فرمالیزم مجاورت مطلوب، از داده‌های تجربی ارتفاعات سد همجوشی استفاده نموده‌ایم. این مقادیر معمولاً با استفاده از کمیت توزیع سد همجوشی محاسبه می‌شوند؛ بنابراین، مقادیر محاسبه شده برای ارتفاعات سد همجوشی وابسته به ضریب انتقال سد پتانسیل هستند. در نتیجه برای بازتولید سطح مقطع همجوشی، ارزیابی مشخصات نسخه‌های انتخاب شده فرمالیزم مجاورت با استفاده از این روش مطلوب به نظر می‌رسد. بدین منظور، سطح مقطع‌های همجوشی واکنش‌های ${}^4_2\text{Ca} + {}^4_2\text{Zr}$ ، ${}^4_2\text{Ca} + {}^4_2\text{Ca}$ و ${}^{22}_{16}\text{S} + {}^{208}_{82}\text{Pb}$ را به عنوان نمونه بررسی نموده‌ایم. این واکنش‌ها از سیستم‌هایی با تقارن ایزوتوپی که عده‌های اتمی آن‌ها به ترتیب بین بازه $Z < 50$ ، $70 < Z < 112$ می‌باشند انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، سطح مقطع همجوشی در انرژی‌های بزرگ‌تر از سد همجوشی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده‌اند:

$$\sigma(E) = \pi R_B^2 \left(1 - \frac{V_B}{E}\right) \quad (8)$$

در این رابطه V_B و R_B به ترتیب موقعیت و ارتفاع سد همجوشی می‌باشند. این رابطه به علت وابستگی منحصر به فرد با ویژگی‌های سد همجوشی انتخاب شده است. نتایج حاصل از محاسبه سطح مقطع همجوشی با استفاده از رابطه (۸) برای واکنش‌های انتخابی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انرژی‌های بزرگ‌تر از سد همجوشی، فرمالیزم‌های BW1991 ، CW1976 و Bass1980 در مقایسه با نسخه‌های دیگر مجاورت، در توافق بهتری با داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی می‌باشند. با توجه به جدول ۴، این نسخه‌ها به ترتیب در بازه‌های $Z \leq 50$ ، $70 < Z \leq 112$ کم‌ترین خطای نسبی را دارند. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، نسخه‌هایی از فرمالیزم مجاورت که داده‌های ارتفاع سد همجوشی را در توافق مناسب‌تری با داده‌های تجربی پیش‌بینی می‌کنند، هم‌چنین دارای توافق مناسب‌تری در محاسبه سطح مقطع همجوشی می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی پرتابه سطح مقطع همجوشی افزایش می‌یابد. این مطلب ناشی از افزایش مقادیر ضریب عبور در انرژی‌های بالاتر از سد همجوشی می‌باشد.

جدول ۴. مقادیر خطای نسبی نسخه‌های مختلف مجاورتی در پیش‌بینی مقادیر سد همجوشی واکنش‌های انتخابی با تقارن ایزوتوپی. خطای نسبی محاسبه شده برای ۱۴۸ واکنش در ستون دوم آرایه شده است. تعداد کل واکنش‌ها در سایر بازه‌ها در داخل پرانتز نشان داده شده‌اند

مدل‌های مجاورت	تمامی سیستم‌های ایزوتوپی (۱۴۸)	$Z \leq 50$ (۱۰۷)	$50 < Z \leq 70$ (۲۶)	$71 < Z \leq 112$ (۱۵)
Prox.۷۷	۲,۱۷۱۹	۲,۱۵۴۰	۲,۱۸۹۳	۲,۲۶۳۴
Prox.۶۶	۱,۹۵۹۹	۱,۹۴۵۶	۱,۹۵۷۶	۲,۰۶۱۰
Prox.۷۶	۱,۳۵۶۰	۱,۴۴۶۷	۰,۹۲۶۸	۱,۳۵۰۳
Prox.۷۹	۱,۵۰۱۷	۱,۵۱۲۹	۱,۳۶۹۹	۱,۶۴۳۰
Prox۸۱-I	۱,۵۸۶۹	۱,۵۹۳۳	۱,۴۹۴۸	۱,۶۹۹۰
Prox۸۱-II	۱,۴۴۳۸	۱,۴۷۷۰	۱,۲۵۴۷	۱,۵۲۴۶
Prox۸۱-III	۱,۴۷۱۰	۱,۴۹۷۵	۱,۳۰۶۹	۱,۵۶۰۲
Prox.۸۴	۲,۲۰۲۴	۲,۱۶۶۶	۲,۲۵۴۷	۲,۳۶۵۹
Prox.۸۸	۱,۴۶۹۲	۱,۴۹۷۳	۱,۳۰۲۵	۱,۵۵۱۴
Prox.۹۵	۱,۴۶۶۰	۱,۴۹۴۴	۱,۲۹۶۹	۱,۵۴۹۴
Prox-۰۳-I	۱,۷۶۸۶	۱,۷۵۹۹	۱,۷۳۵۷	۱,۸۸۴۴
Prox-۰۳-II	۲,۲۵۶۵	۲,۲۵۹۰	۲,۲۴۸۰	۲,۲۵۴۲
Prox-۰۳-III	۲,۳۳۷۵	۲,۳۰۷۸	۲,۳۷۷۵	۲,۴۶۸۱
ModPro۸۸	۱,۴۱۸۲	۱,۶۰۳۰	۰,۶۰۳۷	۱,۰۳۲۸
Prox.۲۰۱۰	۱,۴۸۸۷	۱,۵۲۴۱	۱,۲۷۹۸	۱,۵۸۳۹
Prox.00	۲,۵۹۶۲	۲,۶۳۵۰	۲,۴۳۲۷	۲,۶۰۵۸
Prox.00DP	۱,۶۱۹۶	۱,۶۲۹۸	۱,۵۱۶۱	۱,۷۲۴۶
Bass1973	۵,۶۶۱۵	۶,۵۰۸۹	۲,۱۸۰۷	۲,۹۹۷۸
Bass11977	۱,۳۵۵۶	۱,۴۳۷۳	۰,۸۷۸۱	۱,۴۶۹۶
Bass1980	۱,۳۴۶۱	۱,۴۹۶۲	۰,۷۵۴۸	۱,۰۲۹۹
CW1976	۱,۲۷۶۰	۱,۴۳۱۵	۰,۵۱۴۴	۱,۰۶۵۷
BW1991	۱,۲۳۸۸	۱,۳۶۵۹	۰,۶۲۴۷	۱,۱۳۰۷
Ngo1980	۲,۸۲۶۶	۲,۷۳۲۱	۳,۰۳۷۷	۳,۰۷۲۹
Denisov	۱,۶۴۱۷	۱,۶۴۷۲	۱,۵۳۶۷	۱,۷۸۰۱
Denisov - DP	۲,۲۶۶۴	۲,۵۳۳۵	۱,۴۲۳۴	۱,۳۲۸۳
AW95	۱,۳۳۴۲	۱,۴۲۵۵	۰,۸۹۷۹	۱,۳۲۹۴
Dutt2011	۱,۵۳۴۷	۱,۵۶۹۶	۱,۳۲۷۳	۱,۶۳۳۰

جدول ۵. مقادیر خطای نسبی نسخه‌های مختلف مجاورتی در پیش‌بینی مقادیر سد همجوشی واکنش‌های انتخابی با تقارن ایزوتوپی. خطای نسبی محاسبه شده برای ۱۱۹ واکنش انتخابی ستون دوم آرایه شده است. تعداد کل واکنش‌ها در سایر بازه‌ها در داخل پرانتز نشان داده شده‌اند

مدل‌های مجاورت	تمامی سیستم‌های ایزوتوپی (۱۱۹)	$N \leq 40$ (۳۹)	$40 < N \leq 100$ (۶۴)	$N > 100$ (۱۶)
Prox.۷۷	۲,۲۹۸۴	۲,۳۶۹۲	۲,۲۹۱۲	۲,۱۴۷۲
Prox.۶۶	۲,۰۹۷۳	۲,۲۱۷۸	۲,۰۵۵۸	۱,۹۵۴۷
Prox.۷۶	۱,۵۱۹۶	۲,۱۳۴۰	۱,۰۴۲۸	۱,۳۱۳۴
Prox.۷۹	۱,۶۶۳۷	۲,۰۰۸۸	۱,۴۴۰۹	۱,۵۶۳۹
Prox۸۱-I	۱,۷۴۵۸	۲,۰۲۶۳	۱,۵۸۵۴	۱,۶۱۳۸
Prox۸۱-II	۱,۶۱۱۱	۲,۰۱۱۶	۱,۳۵۲۸	۱,۴۵۶۴
Prox۸۱-III	۱,۶۳۶۹	۲,۰۰۹۱	۱,۴۰۲۳	۱,۴۷۸۸
Prox.۸۴	۲,۳۲۵۰	۲,۳۷۲۰	۲,۳۱۶۳	۲,۲۴۲۹
Prox.۸۸	۱,۶۳۵۵	۲,۰۰۹۱	۱,۴۰۲۳	۱,۴۷۹۷
Prox.۹۵	۱,۶۳۲۴	۲,۰۰۹۲	۱,۳۹۵۸	۱,۴۷۸۰
Prox-۰۳-I	۱,۹۱۶۵	۲,۱۰۲۰	۱,۸۲۷۲	۱,۷۸۷۱
Prox-۰۳-II	۲,۳۸۱۶	۲,۴۶۰۹	۲,۳۸۹۹	۲,۱۳۹۴
Prox-۰۳-III	۲,۴۵۴۶	۲,۴۸۶۸	۲,۴۶۳۲	۲,۳۳۸۹
ModPro۸۸	۱,۵۶۸۸	۲,۳۸۳۶	۰,۹۰۱۴	۱,۰۹۷۴
Prox.۲۰۱۰	۱,۶۹۵۵	۲,۱۹۴۰	۱,۳۵۳۶	۱,۵۲۲۸
Prox.00	۲,۶۷۹۴	۳,۰۸۶۸	۲,۴۲۷۴	۲,۵۶۹۷
Prox.00DP	۱,۸۲۰۹	۲,۱۸۱۱	۱,۶۱۲۶	۱,۶۳۱۸
Bass1973	۵,۵۳۶۱	۹,۱۸۵۳	۱,۹۷۹۸	۲,۵۷۲۳
Bass11977	۱,۴۷۹۴	۲,۰۷۲۲	۰,۹۸۶۹	۱,۳۸۴۳
Bass1980	۱,۵۰۶۵	۲,۲۱۰۶	۰,۹۷۹۱	۱,۰۶۴۸
CW1976	۱,۴۱۳۲	۲,۰۷۲۵	۰,۸۷۲۴	۱,۱۵۷۵
BW1991	۱,۳۸۲۴	۱,۹۸۶۲	۰,۸۹۹۷	۱,۱۶۵۶
Ngo1980	۲,۹۱۱۴	۲,۷۵۶۱	۳,۰۰۴۵	۲,۹۰۱۳
Denisov	۱,۸۳۷۰	۲,۴۳۷۴	۱,۴۱۲۵	۱,۶۲۴۱
Denisov - DP	۲,۳۹۸۳	۳,۷۶۴۹	۱,۱۶۵۴	۱,۶۷۲۱
AW95	۱,۴۶۹۹	۲,۰۵۳۰	۱,۰۲۶۲	۱,۲۵۸۵
Dutt2011	۱,۷۰۶۵	۲,۰۸۹۸	۱,۴۷۷۲	۱,۵۱۱۹



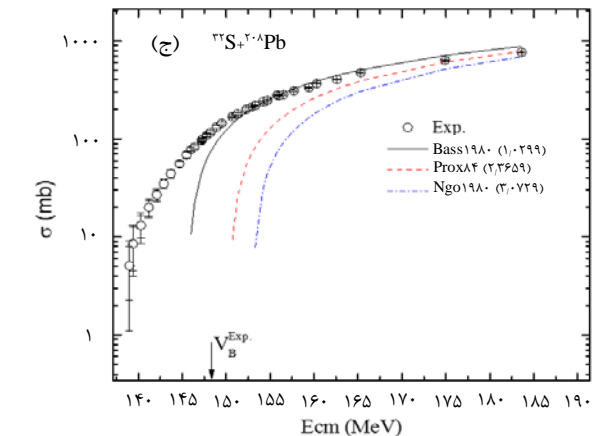
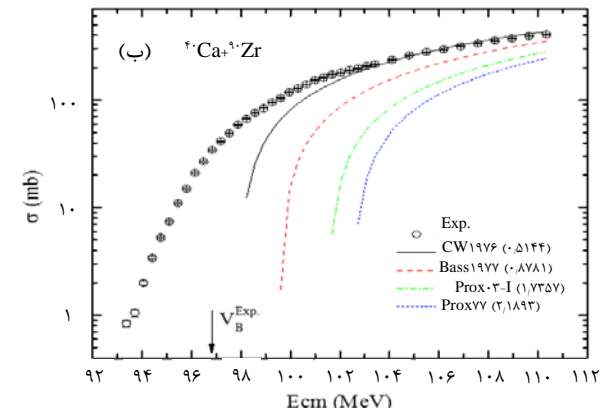
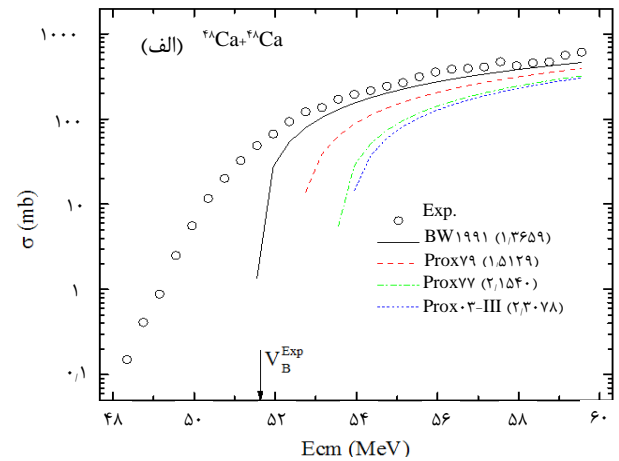
۴. خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از فرمالیسم‌های مجاورتی، ارتفاعات سد همجوشی برای ۲۷۰ واکنش را مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد، نسخه BW۱۹۹۱ کم‌ترین خطای نسبی در پیش‌بینی نظری مقادیر ارتفاع سد همجوشی در واکنش‌های انتخاب شده را دارد. با توجه به اهمیت درجات آزادی ایزواسپین بر روی محاسبه بخش هسته‌ای از پتانسیل کل بین دو هسته برهم‌کنشی، واکنش‌های همجوشی را در تقارن‌های ایزواسپین مختلف بررسی نموده‌ایم. نتایج حاصل نشان می‌دهد، اگرچه نسخه BW۱۹۹۱ دارای بهترین دقت در پیش‌بینی ارتفاع سد همجوشی برای ۲۷۰ واکنش انتخابی می‌باشد، اما این نسخه از پتانسیل مجاورتی نمی‌تواند مشخصات سد همجوشی را برای واکنش‌های همجوشی با تقارن‌های مختلف ایزواسپینی را به خوبی توصیف کند. لذا نتایج حاصل نشان می‌دهد، برای پیش‌بینی مقادیر سد همجوشی، از نسخه‌های مختلف فرمالیسم‌های مجاورتی، به جای یک تک نسخه، استفاده گردد. نسخه‌های انتخابی بر اساس کم‌ترین خطا در پیش‌بینی ارتفاع سد همجوشی به ازای تقارن‌های مختلف ایزواسپینی در جدول ۶ دسته‌بندی شده‌اند.

نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد، در واکنش‌های با تقارن ایزوباریک که در آن $A > 100$ می‌باشد استفاده از ModDProx۸۸ بسیار کارآمدتر از BW۱۹۹۱ می‌باشد و این‌که برای واکنش‌های با تقارن‌های ایزوتوپیک و ایزوتونیک که در آن $Z > 70$ و $N > 100$ می‌باشد Bass۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گیرد. به خاطر وابستگی این تحقیق‌ها به ضریب‌های انتقال، توصیه می‌گردد این مطالعه براساس استفاده از داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی نیز انجام شود. یکی از دلایل موفقیت مدل BW۱۹۹۱ در توصیف مناسب‌تر ارتفاع سد همجوشی در مقایسه با سایر مدل‌ها فرم وودز- سکسونی این پتانسیل می‌باشد که از فرم‌های موفق پتانسیل در توصیف پتانسیل‌های هسته‌ای است. هم‌چنین مدل ModDProx۸۸ از گروه مدل‌هایی است که با استفاده از اطلاعات خواص ماده هسته‌ای بهینه‌سازی شده است [۲۸].

جدول ۶. مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی ارتفاع سد همجوشی برای واکنش‌ها با تقارن‌های ایزوباریک، ایزوتونیک و ایزوتوپیک

تقارن ایزوسپین	دامنه	تعداد واکنش‌ها	مدل‌های مناسب
	$A \leq 30$	۱۶	Prox00DP
	$30 < A \leq 60$	۳۶	BW۱۹۹۱
سیستم‌های ایزوباریک	$60 < A \leq 100$	۴۵	BW۱۹۹۱
	$100 < A \leq 200$	۳۳	ModDProx۸۸
	$200 < A$	۱۴	ModDProx۸۸
	$Z \leq 50$	۱۰۵	BW۱۹۹۱
سیستم‌های ایزوتوپیک	$50 < Z \leq 70$	۲۷	CW۱۹۷۶
	$70 < Z$	۱۵	Bass۱۹۸۰
	$N \leq 40$	۳۹	BW۱۹۹۱
سیستم‌های ایزوتونیک	$40 < A \leq 100$	۶۴	CW۱۹۷۶
	$100 < N$	۱۶	Bass۱۹۸۰



شکل ۲. مقایسه بین محاسبه تئوری سطح مقطع همجوشی (الف) $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ (ب) $^{40}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$ و (ج) $^{32}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ با استفاده از مشخصه برخی نسخه‌های پتانسیل مجاورتی و داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی [۲۳-۲۵]. برهم‌کنش‌های انتخاب شده از سیستم ایزوتوپیک مختلف که عدد اتمی آن‌ها به ترتیب در محدوده $Z < 50$ ، $50 < Z < 70$ ، $70 < Z < 112$ هستند، هم‌چنین مقادیر خطای نسبی از مطالعه داده‌های تجربی ارتفاع‌های سد همجوشی مطابق با هر یک از این نسخه‌های مجاورتی انتخابی در پرانتزها نشان داده شده‌اند. مقادیر ارتفاع سد همجوشی روی محور انرژی مشخص شده‌اند.



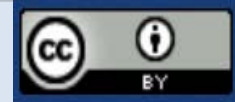
1. A.B. Balantekin, N. Takigawa, *Review of Modern Physics*, **70** (1998) 77; L.C. Vaz, J.M. Alexander, G.R. Satchler, *Fusion barriers, empirical and theoretical: Evidence for dynamic deformation in subbarrier fusion*, *Physics Reports*, **69**, 373 (1981).
2. D.G. Kovar, et al., *Systematics of carbon- and oxygen-induced fusion on nuclei with $12 \leq A \leq 19$* , *Physical Review C.*, **20**, 1305 (1979).
3. E.F. Aguilera, et al., *Search for structure in the fusion of $^{28}\text{Si} + ^{28,30}\text{Si}$ and $^{30}\text{Si} + ^{30}\text{Si}$* , *Physical Review C.*, **33**, 1961 (1986).
4. D. Shapira, et al., *Fusion and peripheral processes in the collisions of $^{20}\text{Ne} + ^{20}\text{Ne}$ and $^{20}\text{Ne} + ^{16}\text{O}$* , *Physical Review C.*, **28**, 1148 (1983).
5. R. Kumari, R.K. Puri, *Parametrization of fusion barriers based on empirical data*, *Nuclear Physics A.*, **933**, 135 (2015).
6. N.K. Dhiman, R.K. Puri, *A comparative study of isotopic dependence of fusion dynamics for Ca-Ni colliding series*, *Acta Physica Polonica B.*, **37**, 1855 (2006).
7. O.N. Ghodsi, R. Gharaei, *The European Physical Journal A* **48** (2012) 21; O.N. Ghodsi, R. Gharaei, and F. Lari, *Physical Review C* **86** (2012) 024615; O.N. Ghodsi and A. Moradi, *Physical Review C* **89** (2014) 064612; M. Salehi and O.N. Ghodsi, *International Journal of Modern Physics E* **20**, 11 (2011) 2337; O.N. Ghodsi, H.R. Moshfegh and R. Gharaei, *Physical Review C.*, **88**, 034601 (2013).
8. V.Y. Denisov, *Interaction potential between heavy ions*, *Physics Letters B.*, **526**, 315 (2002).
9. R. Bass, *Threshold and angular momentum limit in the complete fusion of heavy ions*, *Physics Letters B.*, **47**, 139 (1973); *Nuclear Physics A.*, **231**, 45 (1974).
10. C. Ngo, et al., *Properties of heavy ion interaction potentials calculated in the energy density formalism*, *Nuclear Physics A.*, **252**, 237 (1975).
11. J. Blocki, et al, *Proximity forces* *Annals of Physics*, **105**, 427 (1977).
12. I. Dutt, R.K. Puri, *Systematic study of the fusion barriers using different proximity-type potentials for $N=Z$ colliding nuclei: New extensions*, *Physical Review C.*, **81**, 044615 (2010). I. Dutt, R.K. Puri, *Systematic study of the fusion barriers using different proximity-type potentials for $N=Z$ colliding nuclei: New extensions*, *Physical Review C.*, **81**, 047601 (2010); S. Gautam, A.D. Sood, R.K. Puri, J. Aichelin, *Sensitivity of the transverse flow to the symmetry energy*, *Physical Review C.*, **83**, 034606 (2011).
13. R.K. Puri, M.K. Sharma, R.K. Gupta, *Isotopic dependence of fusion cross-sections-linear relationships*, *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei.*, **3**, 277 (1998).
14. W.D. Myers, W.J. Swiatecki, *Nuclear masses and deformations*, *Nuclear Physics.*, **81**, 1 (1966).
15. P. Moller, J.R. Nix, *Macroscopic potential-energy surfaces for symmetric fission and heavy-ion reactions*, *Nuclear Physics A.*, **272**, 502 (1976).
16. H.J. Krappe, J.R. Nix, *Unified nuclear potential for heavy-ion elastic scattering, fusion, fission, and ground-state masses and deformations*, *Physical Review C.*, **20**, 992 (1979).
17. P. Moller, J.R. Nix, *Nuclear mass formula with a Yukawa-plus-exponential macroscopic model and a folded-Yukawa single-particle potential*, *Nuclear Physics A.*, **361**, 117 (1981).
18. G. Royer, B. Remaud, *Fission processes through compact and cricved shapes*, *Journal of Physics G.*, **10**, 1057 (1984).
19. P. Moller, J.R. Nix, *Nuclear masses from a unified macroscopic-microscopic model*, *Atomic Data and Nuclear Data Tables.*, **39**, 213 (1988).
20. P. Moller, et al, *Nuclear ground-state masses and deformations*, *Atomic Data and Nuclear Data Tables.*, **59**, 185 (1995).
21. K. Pomorski, J. Dudek, *Nuclear liquid-drop model and surface-curvature effects*, *Physical Review C.*, **67**, 044316 (2003).
22. R. Kumar, M.K. Sharma, *Systematic study of various proximity potentials in Pb-daughter cluster radioactivity*, *Physical Review C.*, **85**, 054612 (2012).
23. W.D. Myers, W.J. Swiatecki, *Nucleus-nucleus proximity potential and superheavy nuclei*, *Physical Review C.*, **62**, 044610 (2000).
24. I. Dutt, R. Bansal, *A modified proximity approach in the fusion of heavy ions*, *Chinese Physics Letters*, **27**, 112402 (2010).
25. R. Bass, *Fusion of heavy nuclei in a classical model*, *Nuclear Physics A.*, **231**, 45 (1974).
26. R. Bass, *Nucleus-nucleus potential deduced from experimental fusion cross sections*, *Physical Review Letters*, **39**, 265 (1977).
27. P.R. Christensen, A. Winther, *The evidence of the ion-ion potentials from heavy ion elastic scattering*, *Physics Letters B.*, **65**, 19 (1976).
28. W. Reisdorf, *Heavy-ion reactions close to the Coulomb barrier*, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, **20**, 1297 (1994).
29. A. Winther, *Dissipation, polarization and fluctuation in grazing heavy-ion collisions and the boundary to the chaotic regime*, *Nuclear Physics A.*, **594**, 203 (1995).
30. R.A. Broglia, A. Winther, *Heavy-Ion Reactions*, (Addison-Wesley, New York, 1991), *Parts I and II FIP Lecture Notes Series*.
31. V.Yu. Denisov, *Interaction potential between heavy ions*, *Physics Letters B.*, **526**, 315 (2002).



32. H. Ngo, C. Ngo, *Calculation of the real part of the interaction potential between two heavy ions in the sudden approximation*, *Nuclear Physics A.*, **348**, 140 (1980).
33. M. Trotta, et al, *Sub-barrier fusion of the magic nuclei $^{40,48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$* , *Physical Review C.*, **65**, 011601 (2001).
34. H. Timmers, et al, *A case study of collectivity, transfer and fusion enhancement*, *Nuclear Physics A.*, **633**, 421 (1998).
35. D.J. Hinde, et al, *Isotopic dependence of fusion barrier energies in reactions forming heavy elements*, *Physical Review C.*, **75**, 054603 (2007).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

مهرداد دوانلو، امید ناصر قدسی، سید محمد متولی (۱۴۰۱)، رفتار ارتفاع سد پتانسیل در واکنش همجوشی یون‌های سنگین، ۱۰۱، ۳۰-۳۸

DOI: 10.24200/nst.2022.1444

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1444.html

