



نقش هسته پرتابه در روند پارامترسازی سدهای همجوشی

شهابی، فاطمه - قرائی، رضا - میری حکیم آباد، سید هاشم - رفعت متولی، لاله

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

مطالعه بر روی سد کولنی شکل گرفته در طول فرآیند همجوشی یون‌های سنگین یکی از زمینه‌های تحقیقاتی پرکاربرد در فیزیک هسته‌ای است. در تحقیق حاضر قصد داریم با انجام یک مطالعه سیستماتیک بر روی ۴۷۸ واکنش همجوشی شامل برخورد ۱۴ هسته پرتابه (در محدوده جرمی $1 \leq A_p \leq 40$) با هسته‌های هدف مختلف، به بررسی نقش هسته پرتابه بر روی روند پارامترسازی مشخصات سد همجوشی (شامل محل و ارتفاع سد) بپردازیم. برای محاسبه مقادیر پتانسیل برهم‌کنشی از مدل ایچ وینتر ۱۹۹۵ استفاده کرده‌ایم. برپایه تحلیل رفتار مقادیر بدست آمده محل و ارتفاع سد برحسب کمیت‌های معنادار روابط پارامترسازی شده مناسبی را برای تعیین این مقادیر ارائه داده‌ایم. نتایج حاصل نشان از نقش مستقیم هسته پرتابه بر روی دقت روابط پارامترسازی شده دارد. در این تحقیق در مورد نقش نقطه‌ای بودن پرتابه $1H$ و انرژی بستگی بالای $4He$ در روند پارامترسازی سدهای همجوشی نیز بحث‌هایی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: همجوشی یون سنگین، سد کولنی، پارامترسازی سد، هسته پرتابه

Role of the projectile in the parameterization process of fusion barriers

F. Shahabi, R. Gharaei*, H. Miri-Hakimabad, L. Rafat-Motavalli

Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Science, Department of Physics

Abstract:

The study of the Coulomb barrier formed in the heavy ion fusion reactions is an active area of nuclear physics investigations. In the present work, a systematic study has been performed on the 478 fusion reactions including the collision of 14 projectiles ($1 \leq A_p \leq 40$) with different targets to evaluate the role of the projectile nucleus on the parameterization process of fusion barrier characteristics (including barrier position and height). To calculate the values of the interaction potential, we have used the Aage Winther 1995 model. The obtained results reveal the direct effect of the projectile nuclei on the accuracy of the parameterized relations. In this research, discussions have been presented about the role of the $1H$ projectile point and the high dependence energy of $4He$ in the process of parameterization of fusion barriers.

Key words: heavy ion fusion, Coulomb barrier, barrier parameterization, projectile nucleus

۱ - مقدمه:

درک فرآیند برخورد دو هسته در قالب کانال همجوشی کامل یکی از اصلی‌ترین اهداف محققین فیزیک هسته‌ای در محدوده انرژی‌های کم می‌باشد. از هر دو منظر تئوری و تجربی، دستیابی به چنین درکی به میزان قابل توجهی به آگاهی از رفتار سطح مقطع‌های همجوشی به ازای مقادیر مختلف انرژی هسته پرتابه وابسته است. از طرف دیگر نتایج رویکردهای تئوری مختلف آشکار می‌سازند که سد کولنی شکل گرفته در مقابل هسته‌های پرتابه و هدف تأثیر مستقیم بر روی این رفتار دارند [۱-۳]. این سد که با عنوان "سد همجوشی" نیز شناخته می‌شود، ناشی از رقابت میان نیروهای بلندبرد دافعه کولنی و کوتاه برد جاذبه هسته‌ای می‌باشد. محل و ارتفاع سد دو مشخصه اصلی این نوع سدها می‌باشند که به ترتیب با دو پارامتر R_B و V_B نمایش داده می‌شوند. در اختیار داشتن مدل‌های تئوری مناسب بویژه برای تعیین قدرت برهم‌کنش‌های هسته‌ای میان دو هسته در طول فرآیند همجوشی از نکات حائز اهمیت برای محاسبه مقادیر این دو پارامتر می‌باشد. با وجود عدم شناخت کافی از ماهیت نیروهای هسته‌ای، در طول دهه‌های اخیر مدل‌های متعددی برای انجام این مهم معرفی شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مدل وابسته به انرژی-چگالی اسکریم [۴]، مدل وایپیش دوگانه [۵] و مدل تعمیم یافته قطره مایع [۶] اشاره کرد. وجود پیچیدگی در روند محاسبات رفتار شعاعی پتانسیل برهم‌کنشی واکنش‌های گوناگون و به تبع آن استخراج مقادیر مشخصات سد همجوشی به جهت تحلیل رفتار وابسته به انرژی سطح مقطع‌های همجوشی براساس مدل‌های مذکور، لزوم انجام مطالعات سیستماتیک برای پارامترسازی سدهای همجوشی را آشکار می‌سازد.

از نقطه نظر تئوری، پارامترسازی سد همجوشی به فرآیندی اطلاق می‌شود که در طی آن رفتار مقادیر بدست آمده پارامترهای R_B و V_B به صورت تابعی از کمیت‌های معنادار وابسته به جرم و عدد اتمی هسته‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت وجود وابستگی‌های خطی و یا حتی غیرخطی منظم، تلاش خواهد شد روابط مناسبی برای چنین رفتارهایی ارائه شود که در اصطلاح "روابط پارامترسازی شده" و یا "فرمول‌های جیبی" نامیده می‌شوند. علاوه بر رهایی از پیچیدگی‌های محاسباتی مدل‌های پتانسیل که بعضاً بسیار زمان‌بر نیز هستند، امکان پیش‌بینی مقادیر محل و ارتفاع سد همجوشی برای نواحی جرمی ناشناخته از دیگر جنبه‌های مهم و پرکاربرد دستیابی به چنین روابطی است. محققان در طول سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه پارامترسازی سدهای کولنی شکل گرفته در واکنش‌های همجوشی یون سنگین انجام داده‌اند. این مطالعات در نواحی جرمی مختلف انجام شده است. به عنوان نمونه، می‌توان به تحقیقی که در سال ۲۰۱۸ بر روی واکنش‌های همجوشی با هسته‌های مرکب سنگین (ناحیه جرمی آکتیندها با $103 \leq Z \leq 89$) صورت گرفته اشاره کرد [۷]. در ارتباط با پارامترسازی سدهای همجوشی در محدوده جرمی هسته‌های برهم‌کنشی کاملاً سبک ($1 \leq Z \leq 20$) نیز می‌توان به تحقیقی که در سال ۲۰۱۹ توسط مانجوناتا و همکارانش انجام شده اشاره



کرد [۸]. تمرکز بر روی پارامترسازی سدهای همجوشی در واکنش‌های شامل پرتابه‌های ثابت یکی دیگر از زمینه‌های علاقه‌مندی محققان در سال‌های اخیر بوده است. از نخستین تحقیقاتی که در این راستا صورت گرفته است می‌توان به معرفی روابط پارامترسازی شده برای محل و ارتفاع سد همجوشی در واکنش‌های شامل پرتابه‌های پروتون و هلیوم برپایه نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورت اشاره کرد [۹]. نتایج بدست آمده در آن تحقیق آشکار می‌سازد که مقادیر پارامترسازی شده مشخصات سد همجوشی ناشی از نسخه اصلی پتانسیل مجاورت همخوانی قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی متناظر دارند. مطالعات در این راستا، در سال ۲۰۱۶ برپایه استفاده از روش‌های غیرمستقیم پارامترسازی مقادیر R_B و V_B با استفاده از سه مدل تأیید شده AW95، Bass 80 و Prox. 2010 ادامه یافت [EPJA]. در تحقیق حاضر با هدف دستیابی به نقش هسته‌های پرتابه در روند پارامترسازی سدهای همجوشی، تلاش خواهیم کرد محدوده جرمی این هسته‌ها را نسبت به مطالعات گذشته گسترش دهیم. برای دستیابی به این هدف تعداد ۴۷۸ واکنش‌های همجوشی شامل ترکیب ۱۴ پرتابه (پروتون به عنوان سبک‌ترین و ^{40}Ar به عنوان سنگین‌ترین پرتابه) با هسته‌های هدف گوناگون را برگزیدیم. برای انجام محاسبات مربوط به پتانسیل‌های برهم‌کنشی از مدل مورد تأیید [۱۰] ایچ وینتر ۱۹۹۵ (AW95) بهره گرفتیم.

۲ - روش کار:

هدف از انجام تحقیق حاضر تعیین نقش هسته‌های پرتابه در روند پارامترسازی سدهای همجوشی می‌باشد. برای دستیابی به این هدف تلاش کرده‌ایم با بهره‌گیری از ۴۷۸ سیستم همجوشی مختلف شامل ۱۴ پرتابه در محدوده جرمی $1 \leq A_p \leq 40$ مطالعه‌ای جامع را انجام دهیم. لیست پرتابه‌های انتخابی، به همراه تعداد واکنش‌ها و محدوده جرمی هسته‌های هدف آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: پرتابه‌های انتخابی به همراه تعداد واکنش‌های مورد بررسی و محدوده عدد اتمی هسته‌های هدف.

پرتابه	تعداد واکنش	محدوده عدد اتمی اهداف
^1H	۲۳	$23 \leq Z_T \leq 52$
^4He	۲۹	$20 \leq Z_T \leq 94$
^6Li	۲۷	$4 \leq Z_T \leq 92$
^9Be	۲۲	$4 \leq Z_T \leq 92$
^{11}B	۱۴	$5 \leq Z_T \leq 95$
^{12}C	۵۴	$3 \leq Z_T \leq 93$
^{14}N	۲۴	$4 \leq Z_T \leq 92$



پرتابه	تعداد واکنش	محدوده عدد اتمی اهداف
^{16}O	۸۴	$4 \leq Z_T \leq 96$
^{19}F	۲۹	$4 \leq Z_T \leq 93$
^{20}Ne	۳۰	$6 \leq Z_T \leq 92$
^{28}Si	۲۷	$6 \leq Z_T \leq 82$
^{32}S	۵۲	$6 \leq Z_T \leq 92$
^{35}Cl	۲۵	$6 \leq Z_T \leq 92$
^{40}Ar	۳۸	$6 \leq Z_T \leq 92$

۲-۱- محاسبه پتانسیل برهم‌کنشی

با فرض صفر بودن تکانه زاویه‌ای l ، پتانسیل برهم‌کنشی میان دو هسته در طول فرآیند همجوشی به صورت مجموع دو بخش کولنی و هسته‌ای تعریف می‌گردد. در ساده‌ترین حالت بخش کولنی را می‌توان به شکل $V_C(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r$ تعریف کرد که در آن Z_i نماینده تعداد پروتون‌های هسته‌های پرتابه و هدف می‌باشد. برای تعیین بخش هسته‌ای از مدل پتانسیل AW95 بهره گرفته‌ایم که فرمی وودس-سکسونی دارد،

$$V_N^{AW95}(r) = \frac{-V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right)} \quad (1)$$

که در این رابطه V_0 ، R_0 و a به ترتیب نشان‌دهنده عمق پتانسیل، پارامترهای شعاع و پخشیدگی سطح می‌باشند. لازم به ذکر است که تعاریف این سه پارامتر در مراجعی نظیر [۱۰] ارائه شده‌اند. پس از محاسبه پتانسیل برهم‌کنشی کل برپایه رویکردهای مذکور، مقادیر مکان و ارتفاع سد همجوشی در هر یک از واکنش‌های انتخابی از طریق روابط ذیل قابل محاسبه خواهند بود،

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

که در آن R_B^{theor} محل سد حاصل از مدل تئوری می‌باشد.

۲-۲- پارامترسازی سد همجوشی

همانگونه که در بخش‌های قبل نیز بدان اشاره شده بود، پارامترسازی سدهای همجوشی به معنای فرمول‌بندی رفتار مقادیر R_B و V_B حاصل از یک مدل پتانسیل نظیر AW95 برحسب کمیت‌های فیزیکی معنادار می‌باشد. در تحقیق حاضر روند تغییرات مقادیر بدست آمده برای این دو پارامتر را به ترتیب به صورت تابعی از $\langle r_1^2 \rangle^{1/2} + \langle r_2^2 \rangle^{1/2}$ و $\frac{Z_1 Z_2}{\langle r_1^2 \rangle^{1/2} + \langle r_2^2 \rangle^{1/2}}$ مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. در اینجا برای تعیین مقادیر شعاع $\langle r_i^2 \rangle^{1/2}$ از تعریف زیر بهره گرفته‌ایم،



$$\langle r_{1(2)}^2 \rangle^{1/2} = \left[\frac{\int_0^\infty \rho_{1(2)}(r) r^4 dr}{\int_0^\infty \rho_{1(2)}(r) r^2 dr} \right]^{1/2} \quad (3)$$

که در آن $\rho_{1(2)}(r)$ توابع توزیع چگالی هسته‌های برهم‌کنشی است. جزئیات بیشتر از محاسبات مقادیر شعاع rms هسته‌ها در مرجع [۱۱] ارائه شده است. بعد از ارائه روابط پارامترسازی مناسب برای سدهای همجوشی واکنش‌های مختلف، اعتبار آنها را می‌توان از طریق روابط ذیل مورد ارزیابی قرار داد،

$$\Delta R_B(\%) = \frac{R_B^{\text{par}} - R_B^{\text{exact}}}{R_B^{\text{exact}}} \times 100 \quad \Delta V_B(\%) = \frac{V_B^{\text{par}} - V_B^{\text{exact}}}{V_B^{\text{exact}}} \times 100 \quad (4)$$

همانگونه که مشاهده می‌شود این روابط درصد اختلاف نسبی میان مقادیر پارامترسازی شده محل و ارتفاع سد همجوشی را با آنهایی که به صورت دقیق از مدل پتانسیل بدست می‌آیند را تعیین می‌کنند.

۳. نتایج:

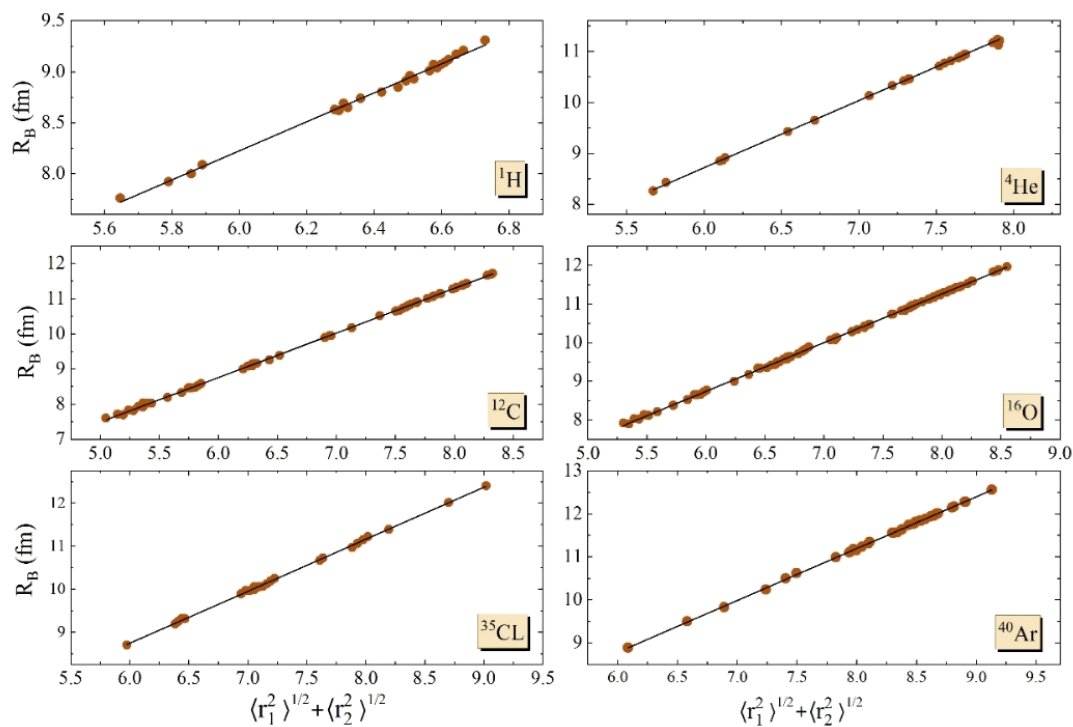
در گام نخست از محاسبات این پژوهش، مقادیر پتانسیل برهم‌کنشی را برای تمامی سیستم‌های همجوشی انتخابی برپایه مدل پتانسیل AW95 محاسبه کرده‌ایم. سپس مقادیر محل و ارتفاع سد همجوشی را با استفاده از رابطه (۲) تخمین زده‌ایم. نتایج حاصل را به ترتیب به صورت تابعی از $\langle r_1^2 \rangle^{1/2} + \langle r_2^2 \rangle^{1/2}$ و $\frac{Z_1 Z_2}{\langle r_1^2 \rangle^{1/2} + \langle r_2^2 \rangle^{1/2}}$ در شکل‌های ۱ و ۲ برای واکنش‌های همجوشی شامل پرتابه‌های ^{35}Cl ، ^{16}O ، ^{12}C ، ^4He ، ^1H و ^{40}Ar به عنوان نمونه رسم کرده‌ایم. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقادیر بدست آمده R_B و V_B برحسب کمیت‌های مذکور از یک روند خطی و صعودی تبعیت می‌کنند. برای فرمول‌بندی رفتارهای مشاهده شده، روابط ذیل را پیشنهاد می‌دهیم،

$$R_B^{\text{Par.}} = \alpha (\langle r_1^2 \rangle^{1/2} + \langle r_2^2 \rangle^{1/2}) + \beta \quad (5)$$

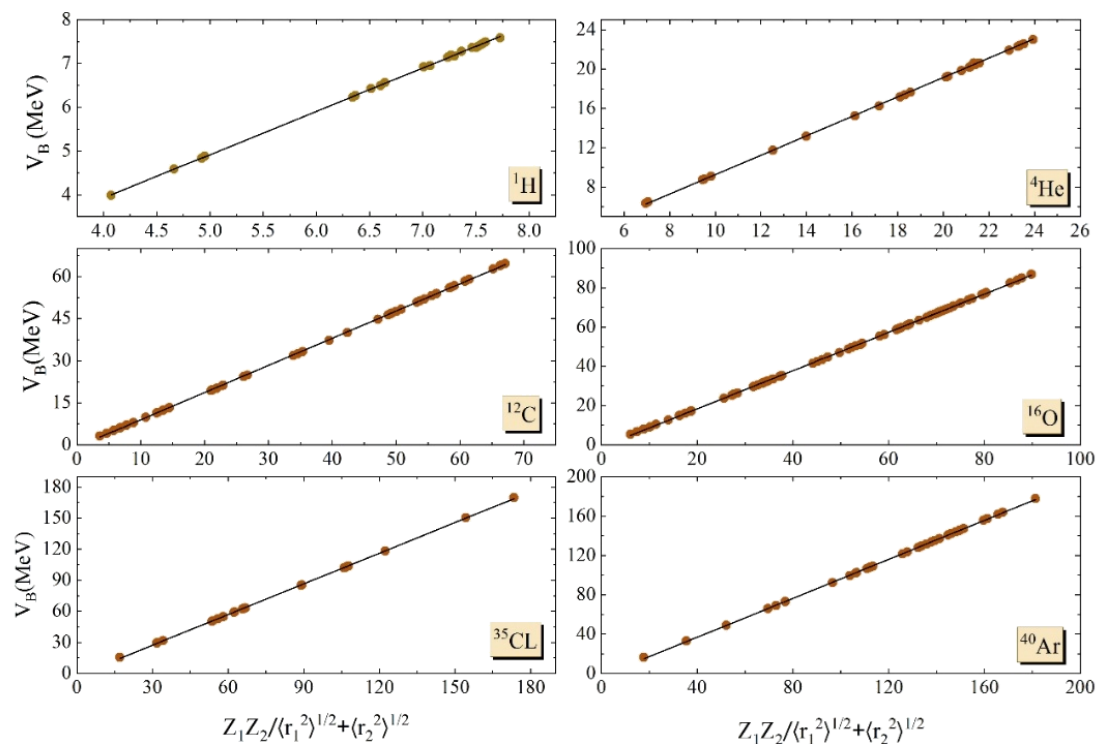
$$V_B^{\text{Par.}} = \alpha' \left(\frac{Z_1 Z_2}{\langle r_1^2 \rangle^{1/2} + \langle r_2^2 \rangle^{1/2}} \right) + \beta' \quad (6)$$

که مقادیر بدست آمده برای شیب و عرض از مبدا خطوط برازش شده محل سد به ترتیب در بازه‌های ۱.۴۲ $\leq \alpha \leq ۱.۲۰$ و $۱.۵۶ \leq \beta \leq ۰.۳۲$ قرار دارند. حال آنکه مقادیر مذکور برای پارامترسازی ارتفاع‌های سد همجوشی به ترتیب در بازه‌های $۰.۹۹۰۸ \leq \alpha' \leq ۰.۹۹۰۶$ و $-۰.۰۳۸ \leq \beta' \leq -۲.۸۸$ قرار دارند. برای بررسی اعتبار روابط معرفی شده، برپایه رابطه (۴) مقادیر درصد اختلاف نسبی $\Delta R_B(\%)$ و $\Delta V_B(\%)$ را محاسبه کرده‌ایم. نتایج حاصل در شکل‌های ۳ و ۴ برای چند پرتابه نامبرده شده نمایش داده شده‌اند.

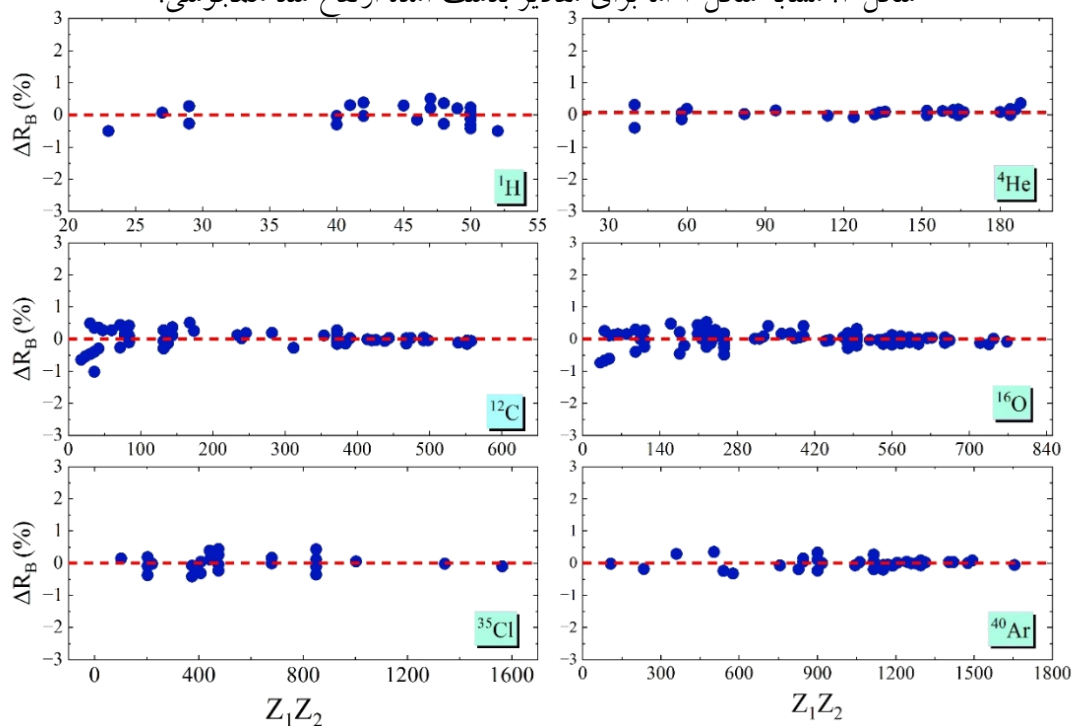
همانگونه که مشاهده می‌شود اختلاف نسبی میان مقادیر پارامترسازی شده و دقیق محل سد برای پرتابه‌های مختلف در محدود $\pm 1\%$ درصد قرار دارند که حاکی از کیفیت قابل قبول رابطه پیشنهادی (۵) می‌باشند. در تحلیل نتایج بدست آمده $\Delta V_B(\%)$ باید اشاره کنیم که به نظر می‌رسد شرایط همخوانی میان مقادیر پارامترسازی شده و دقیق ارتفاع سد همجوشی برای واکنش‌های شامل پرتابه‌های پروتون و هلیوم با سایر پرتابه‌ها متفاوت است. در حقیقت، مشاهده می‌شود مادامیکه نتایج بدست آمده برای $\Delta V_B(\%)$ حاصل از مدل AW95 را براساس هسته‌های پرتابه تفکیک می‌کنیم، به استثنای پرتابه‌های p و ${}^4\text{He}$ ، دقت رابطه پیشنهادی (۶) در تعیین مقادیر ارتفاع سد همجوشی برای محدود هسته‌های هدف سبک به نسبت هسته‌های سنگین کمتر است. هر چند تا حدودی قابل پیش‌بینی است که نقطه‌ای بودن پروتون و انرژی بستگی قابل توجه ${}^4\text{He}$ شرایط متفاوتی را برای نتایج این دو پرتابه نسبت به سایر پرتابه‌ها رقم بزند، اما دستیابی به نتیجه قطعی در این راستا نیازمند انجام مطالعات بیشتر است که در پژوهش‌های آتی به آن خواهیم پرداخت.



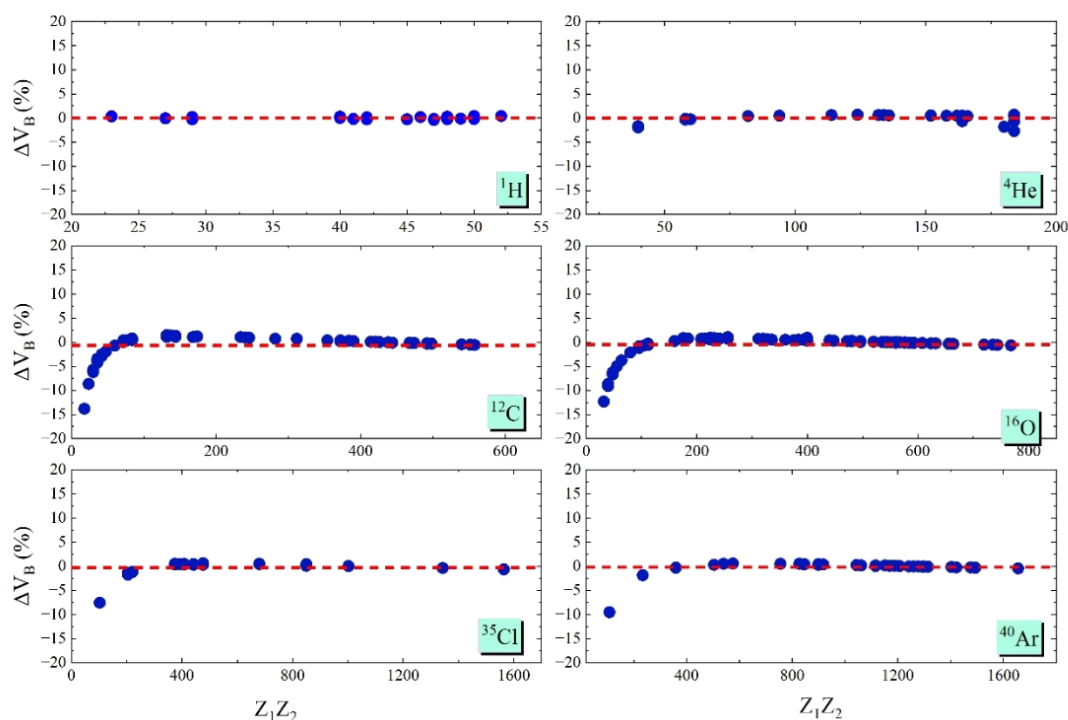
شکل ۱: رفتار مقادیر R_B در واکنش‌های شامل پرتابه‌های ${}^1\text{H}$ ، ${}^4\text{He}$ ، ${}^{12}\text{C}$ ، ${}^{16}\text{O}$ ، ${}^{35}\text{Cl}$ و ${}^{40}\text{Ar}$.



شکل ۲: مشابه شکل ۱ اما برای مقادیر بدست آمده ارتفاع سد همجوشی.



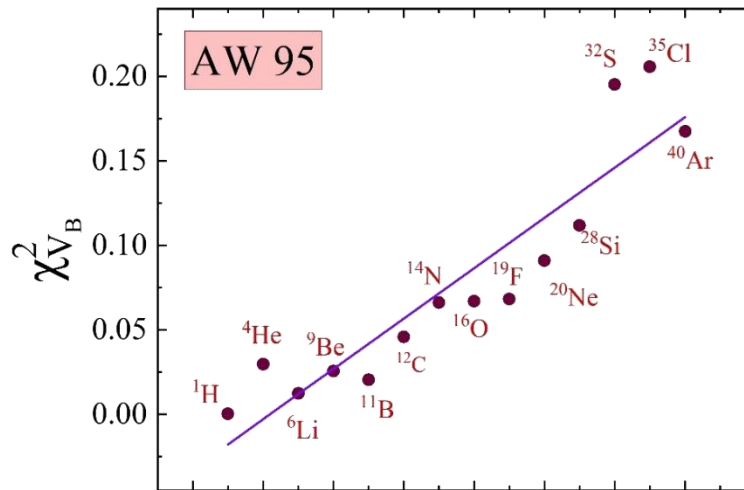
شکل ۳: درصد اختلاف میان مقادیر پارامترسازی شده و دقیق محل سد در واکنش‌های با ۶ پرتابه دلخواه.



شکل ۴: درصد اختلاف میان مقادیر پارامترسازی شده و دقیق محل سد در واکنش‌های با ۶ پرتابه دلخواه.

۴. بحث و نتیجه گیری:

در تحقیق حاضر به بررسی نقش هسته پرتابه بر روی روند پارامترسازی مشخصات سد همجوشی در ۴۷۸ واکنش مختلف پرداختیم. مشاهده شد روابط پیشنهادی برای فرمول‌بندی رفتار مقادیر R_B و V_B از دقت قابل قبولی برخوردارند. برای اینکه نقش هسته‌های پرتابه بر روی روند پارامترسازی ارتفاع سدهای همجوشی بهتر مشخص شود، در شکل ۵ مقادیر χ^2 را به صورت تابعی از عدد اتمی ۱۴ هسته پرتابه انتخابی رسم کرده‌ایم.



شکل ۴: روند تغییرات مقادیر پارامتر χ^2 (رابطه ۷) برای هسته‌های پرتابه مختلف.

خاطر نشان می‌شود که این مقادیر از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشند،

$$\chi^2 = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m [V_B^{\text{Par.}} - V_B^{\text{Theor.}}]^2 \quad (۷)$$

به نظر می‌رسد بدون محدودیت در انتخاب هسته‌های هدف، با افزایش جرم هسته‌های پرتابه دقت فرمول‌های پارامترسازی کاهش می‌یابد. با این وجود، اختلافات مشاهده شده در نواحی هسته‌های سبک که با بزرگتر شدن هسته‌های پرتابه افزایش می‌یابد اهمیت بررسی اثرات عدم تقارن در روند پارامترسازی سدهای همجوشی را آشکار می‌سازد.

۵. مراجع:

- [1] XiaoJun Bao, Guang Jin Li, Nucl. Phys. A **1039**, 122739 (2023).
- [2] V. Yu. Denisov, I. Yu. Sedykh, Eur. Phys. J. A **55**, 153 (2019).
- [3] Shilpa Rana, M. Bhuyan, S. K. Patra, Raj Kumar, Phys. Rev. C **109**, 044613 (2024).
- [4] D. Vautherin and D. M. Brink, Phys. Rev. C **5**, 626 (1972).
- [5] D. T. Khoa and G. R. Satchler, Nucl. Phys. A **668**, 3 (2000).
- [6] J Mignen, G Royer, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **16**, L227 (1990).
- [7] H.C. Manjunatha, K.N. Sridhar, Nucl. Phys. A **971**, 83 (2018).
- [8] H. C. Manjunatha, K. N. Sridhar, Indian J Phys. **95**, 935 (2021).
- [9] R. Kumari, S. Kaur, Chin. Phys. Lett. **31**, 112501 (2014).
- [10] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 064609 (2010).
- [11] G. L. Zhang, M. Pan, Inter. J Mod. Phys. E **25**, 1650082 (2016).