



تحلیل رفتار وابسته به انرژی سطح مقطع‌های همجوشی در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$

موسوی چرندابی، میرحسین - قرائی، رضا^۱ - میری حکیم آباد، سیدهاشم - رفعت متولی، لاله
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده :

بازتولید رفتار وابسته به انرژی سطح مقطع همجوشی در واکنش‌های یون سنگین برپایه رویکردهای نظری مختلف همواره از موضوعات مورد توجه مطالعات هسته‌ای بوده است. اهمیت این موضوع در واکنش‌هایی که اخیراً مطالعات آزمایشگاهی آنها انجام شده است به مراتب بیشتر خواهد بود. از اینرو در تحقیق حاضر تلاش کرده‌ایم برپایه یکی از نسخه‌های به روز فرمول‌بندی مجاورت (یعنی مدل *Proximity 2010*) به تفسیر این رفتار در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ بپردازیم. برای محاسبات سطح مقطع از رویکرد جفت شدگی کانال‌ها (شامل ارتعاشات سطحی چهارقطبی و هشت قطبی در هر دو هسته پرتابه و هدف) بهره گرفته‌ایم. نتایج حاصل لزوم اعمال اصلاحاتی در قدرت کشش سطحی میان هسته‌های پرتابه و هدف در طول فرآیند همجوشی را آشکار می‌سازد. پس از اعمال این اصلاحات، همخوانی میان مقادیر تئوری و تجربی سطح مقطع در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مطالعاتی از این دست ضرورت وجود نسخه‌های جدیدی از ضریب کشش سطحی را برای توصیف فرایند همجوشی کامل دو هسته را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: واکنش‌های همجوشی یون سنگین، پتانسیل مجاورت، سطح مقطع همجوشی، جفت‌شدگی کانال‌ها

The analysis of the energy dependent of the fusion cross sections in $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$

M. H. Moussavi Charandabi, R. Gharaei*, H. Miri-Hakimabad, L. Rafat-Motavalli
Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Science, Department of Physics

Abstract :

Reproducing the energy-dependent Behavior of fusion cross sections in heavy-ion reactions based on various theoretical approaches. The energy-dependent behavior of fusion cross sections in heavy-ion reactions has always been a topic of significant interest in nuclear studies. This issue becomes even more critical for reactions that have recently been investigated experimentally. Therefore, in the present study, we have aimed to interpret this behavior in the reaction $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ using an updated version of the proximity potential formulation, namely the Proximity 2010 model. For the cross-section calculations, we employed the coupled-channels approach, which includes quadrupole and octupole surface vibrations in both the projectile and target nuclei. The results reveal the necessity of modifying the surface tension strength between the projectile

^۱ ایمیل نویسنده مسئول: rezagharaei@um.ac.ir



and target nuclei during the fusion process. After applying these modifications, the agreement between theoretical and experimental cross-section values for the $^{30}\text{Si}+^{142}\text{Ce}$ reaction significantly improves. Such studies highlight the need for new versions of the surface tension coefficient to accurately describe the complete fusion process of two nuclei.

Keywords: heavy ion fusion reactions, proximity potential, fusion cross section, coupled channels.

۱ - مقدمه:

مطالعه فرآیند برخورد یون‌های سنگین کم انرژی (از مرتبه مگا الکترون ولت) یکی از زمینه‌های تحقیقاتی پرکاربرد و البته جذاب در هر دو حوزه مطالعات نظری و تجربی فیزیک هسته‌ای می‌باشد [۱،۲]. از جمله مهمترین واکنش‌هایی که امکان رخداد آن‌ها در حین چنین برخوردهایی وجود دارد، کانال همجوشی کامل است که منجر به شکل‌گیری یک سیستم نوکلئونی به شدت برانگیخته به نام هسته مرکب می‌شود. این واکنش‌ها را می‌توان یک ابزار کارآمد برای تعمیم جدول تناوبی عناصر و شناخت هر چه بیشتر جزایر پایداری دانست. مطالعه نیروهای پتانسیل هسته‌ای در واکنش‌های همجوشی برای درک دینامیک برخورد یون‌های سنگین، به ویژه در انرژی‌های نزدیک و زیر سد کولنی، حیاتی است. نظریه نیروهای مجاورت چارچوبی را برای تعیین قدرت برهم‌کنش بین دو هسته ارائه می‌دهد که مبتنی بر ویژگی‌هایی همچون ضرایب انرژی سطحی و ضخامت سطحی هسته‌ای می‌باشد [۳]. نکته‌ای که در این بین می‌بایست به آن توجه داشت این است که در اکثر تحقیقات صورت گرفته برپایه پتانسیل‌های مجاورت، محوریت کار بازتولید داده‌های تجربی ارتفاع و محل سدهای همجوشی بوده است. به عبارت دیگر تعداد محدودی از مطالعات این حوزه با هدف اعتبارسنجی پتانسیل‌های مجاورت از طریق همخوانی میان داده‌های تئوری و آزمایشگاهی سطح مقطع انجام شده است. دانشمندان در این تحقیقات محدود، مقادیر سطح مقطع همجوشی را نیز تنها برپایه فرمول وانگ محاسبه کرده‌اند [۶-۴]؛ رویکردی که مبتنی بر مدل نفوذ از سد تک بعدی و بنابراین مستقل از اثرات ساختار هسته‌ها می‌باشد. تحت این شرایط انجام یک مطالعه جامع برای تعیین عملکرد نسخه‌های مختلف فرمول‌بندی مجاورت در بازتولید سطح مقطع‌های همجوشی یون سنگین برپایه مدل جفت‌شدگی کانال‌ها^۲ (شامل اثرات ارتعاشی و دورانی هسته‌ها) [۷] با هدف معرفی نسخه‌های برگزیده امری ضروری به نظر می‌رسد. انجام چنین تحقیقی بویژه برای واکنش‌های همجوشی‌ای که داده‌های

^۱. Coupled-channels (CC)



آزمایشگاهی سطح مقطع آنها اخیراً گزارش شده‌اند می‌تواند بسیار جذاب باشد. از اینرو در تحقیق حاضر تلاش کرده‌ایم رفتار وابسته به انرژی سطح مقطع‌های تجربی را در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ برپایه یکی از به روزترین نسخه‌های پتانسیل مجاورت (یعنی مدل Prox. 2010) همراه با اعمال اثرات جفت‌شدگی کانال‌ها مورد ارزیابی قرار دهیم. لازم به ذکر است که مقادیر آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی در این واکنش در سال ۲۰۲۳ اندازه‌گیری و گزارش شده‌اند [۸].

۲. روش کار:

در گام نخست از محاسبات مقاله حاضر مقادیر پتانسیل هسته-هسته را با استفاده از مدل Prox. 2010 محاسبه نموده‌ایم. برپایه این مدل، پتانسیل هسته‌ای به شکل زیر تعریف می‌گردد،

$$V_N^{\text{Prox.2010}}(r) = 4\pi\gamma b \bar{R} \Phi\left(\frac{s}{b}\right) \text{ MeV} \quad (1)$$

که در آن $\bar{R}$ و s به ترتیب شعاع انحنای متوسط و فاصله جدایی بین دو سطح می‌باشند. در تعریف پتانسیل مجاورت b پارامتر ضخامت سطح می‌باشد که مقدار آن را بطور معمول حدود 1 fm در نظر گرفته می‌شود. در رابطه فوق $\Phi(s)$ تابع جهانی نام دارد که مستقل از جرم و شکل است. برای دسترسی به تعاریف دقیق هر یک از این کمیت‌ها در نسخه‌های مختلف فرمول‌بندی مجاورت می‌توان به مراجعی نظیر [۶-۸] رجوع کرد. علاوه براین، γ ضریب انرژی سطحی (ضریب کشش سطحی) نام دارد و به شکل زیر تعریف می‌گردد،

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

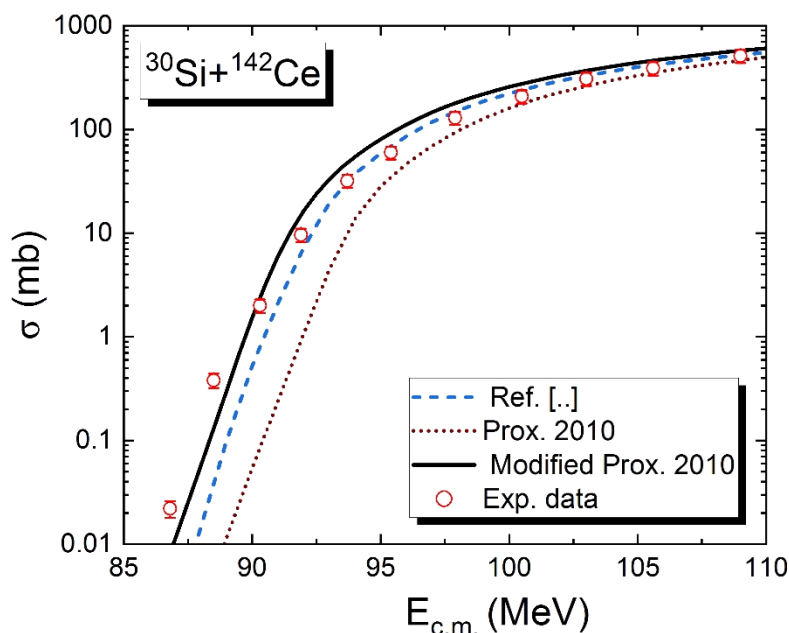
که در آن γ_0 و k_s به ترتیب ثابت انرژی سطحی و ثابت عدم‌تقارن سطح هستند که برای مدل پتانسیل حاضر به ترتیب دارای مقادیر $1.460734 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^{-2}$ و 4.0 می‌باشند. پس از محاسبه بخش هسته‌ای پتانسیل و اضافه کردن جمله دافعه کولنی به آن قادر خواهیم بود رفتار شعاعی پتانسیل برهم‌کنشی کل را در فواصل بین هسته‌ای مختلف محاسبه و ارزیابی نماییم. پس از انجام این مرحله آمادگی لازم برای انجام محاسبات سطح مقطع را براساس کد CCFULL [۷] خواهیم داشت. لازم به ذکر است که این کد برنامه‌ای را برای محاسبه سطح مقطع‌های همجوشی و متوسط تکانه زاویه‌ای هسته مرکب با احتساب تمام مراتب جفت‌شدگی میان حرکت نسبی هسته‌های



برهم‌کنشی و چندین حرکت جمعی هسته‌ای ارائه می‌دهد. در این برنامه از تقریب بدون-کورولیس برای کاهش ابعاد معادلات کانال‌های جفت شده استفاده شده است [۷].

۳- نتایج:

همانگونه که بدان اشاره شد هدف از مقاله حاضر ارزیابی رفتار وابسته به انرژی سطح مقطع‌های همجوشی در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ براساس مدل پتانسیل Prox. 2010 می‌باشد. محاسبات مربوط به سطح مقطع همجوشی را برپایه کد CCFULL با احتساب اثرات برانگیختگی ناشی از ارتعاشات سطح هسته‌های پرتابه و هدف انجام داده‌ایم. این اثرات شامل جفت‌شدگی با حالت‌های برانگیختگی کم انرژی 2^+ و 3^- در هر دو هسته برهم‌کنشی می‌باشد. جزئیات مربوط به اطلاعات ساختاری هسته‌ها در این دو حالت در جدول ۱ لیست شده است. خاطر نشان می‌شود در محاسبات سطح مقطع اثرات هر دو مد برانگیختگی‌های چهار قطبی و هشت قطبی هسته‌های پرتابه و هدف (در حالت تک فونونی) لحاظ شده‌اند. در شکل ۱ نتایج بدست آمده از این محاسبات را با داده‌های آزمایشگاهی متناظر واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ مقایسه کرده‌ایم. در این شکل همچنین نتایج حاصل از محاسبات مرجع [۸] را نیز لحاظ کرده‌ایم. لازم به ذکر است این محاسبات برپایه مدل پتانسیل WS (با استفاده از پارامترهای $V_0=71.53 \text{ MeV}$, $r_0=1.18 \text{ fm}$ و $a_0=0.70 \text{ fm}$) و برپایه کد محاسباتی CCFULL (با ورودی‌های مشابه آنچه در جدول ۱ بیان شد) انجام شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود همخوانی قابل قبولی میان نتایج حاصل از مقاله با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. این در حالی است که مقادیر سطح مقطع حاصل از مدل Prox. 2010 در مقایسه با هر دوی این رویکردها (بویژه در محدوده انرژی‌های زیرسدی) پایین‌ترند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل مجاورت نیازمند اعمال اصلاحات است. با توجه به نتایج شکل ۱، در می‌یابیم که برای افزایش همخوانی می‌بایست مقادیر سطح حاصل از مدل Prox. 2010 افزایش یابند. بدیهی است افزایش احتمال رخداد فرایند همجوشی با افزایش قدرت پتانسیل هسته‌ای قابل تحقق است.



شکل ۱: مقایسه رفتار وابسته به انرژی مقادیر سطح مقطع همجوشی در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ با نسخه اصلی و اصلاح شده فرمول بندی مجاورت. در این شکل نتایج محاسبات مرجع [۸] نیز لحاظ شده است.

از طرفی با استفاده از رابطه (۱) در می‌یابیم پتانسیل هسته‌ای با قدرت کشش سطحی رابطه مستقیم دارد. با توجه به اهمیت این پارامتر در تحقیقات هسته‌ای و وجود پارامترهای قابل تنظیم نظیر γ_0 در آن در این بخش تلاش کرده‌ایم با تنظیم قدرت کشش سطحی میان دو هسته هدف و پتانسیل از طریقه تغیر مقادیر γ_0 ، اختلاف میان

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(\sigma_{Theo.})_i - (\sigma_{Exp.})_i}{(\sigma_{Theo.})_i + (\sigma_{Exp.})_i} \right)^2} \times 100.$$

داده‌های تئوری و تجربی سطح مقطع را مینیمم. ضریب کشش سطحی γ در رابطه (۲)، نقش پار

در شکل ۲ رفتار مقادیر درصد خطای نسبی χ به صورت تابعی از γ_0 برای واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ نمایش داده‌ایم. مقادیر این کمیت از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشند،

(۳)

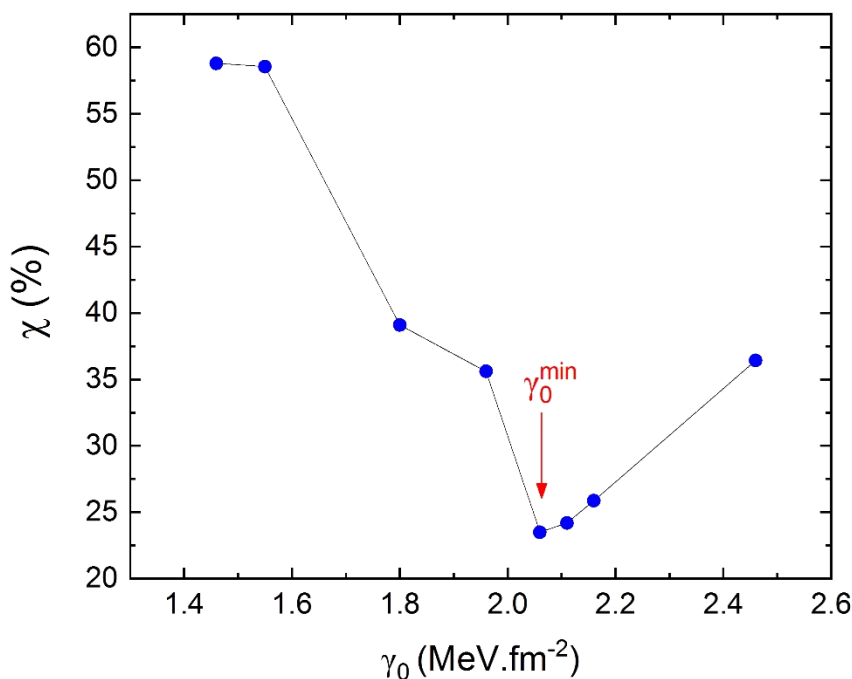


مشاهده می‌شود که حداقل اختلاف میان مقادیر تئوری و تجربی سطح مقطع همجوشی در حدود $\gamma_0 \approx 2.06 \text{ MeV.fm}^{-2}$ حاصل می‌شود که حاکی از افزایش قدرت کشش سطحی در این واکنش می‌باشد. البته قصد داریم در ادامه تحقیقات خود در این حوزه، دقت این مقدار را تا چند رقم بعد از اعشار افزایش دهیم. نکته دیگری که می‌بایست به آن توجه داشت این است که مقدار χ حاصل از نسخه اصلاح شده مدل Prox. 2010 ($\chi=23.49$) حتی از مقداری که براساس نتایج گزارش شده در مقاله بدست می‌آید ($\chi=38.94$) نیز کوچکتر است که حاکی از توافق بهتر با داده‌های آزمایشگاهی سطح مقطع در کل محدوده انرژی گزارش شده است. در شکل ۱، سطح مقطع‌های حاصل از فرم اصلاح شده مدل Prox. 2010 (به ازای $\gamma_0 \approx 2.06 \text{ MeV.fm}^{-2}$ و $k_s=4.0$) نمایش داده شده‌اند. افزایش توافق با داده‌های آزمایشگاهی سطح مقطع به نسبت نسخه اصلی پتانسیل مجاورت کاملاً در این شکل مشخص است. اختلافات موجود در محدوده انرژی‌های زیرسدی را می‌توان به وجود اثرات انتقال نوترون در این واکنش نسبت داد که در ادامه تحقیقات خود در این راستا قصد داریم نقش آنها را نیز بر روی سطح مقطع‌های همجوشی مورد ارزیابی قرار دهیم.

جدول ۱: اطلاعات ساختاری مربوط به ترازهای 2^+ و 3^- در هسته‌های پرتابه و هدف که در محاسبات سطح

مقطع براساس مدل جفت شدگی کانال‌ها بکارگرفته شده‌اند.

هسته	I^π	β_I	$E_I(\text{MeV})$
^{30}Si	2^+	-0.24	2.24
	3^-	0.27	5.49
^{142}Ce	2^+	0.12	0.68
	3^-	0.13	1.65



شکل ۲: رفتار مقادیر χ بر حسب γ_0 برای واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$.

۴. بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق به مطالعه رفتار وابسته به انرژی سطح مقطع‌های همجوشی در واکنش $^{30}\text{Si} + ^{142}\text{Ce}$ برپایه مدل پتانسیل Prox. 2010 پرداخته‌ایم. نتایج اولیه این تحقیق آشکار می‌سازد که نسخه اصلی این مدل قادر به بازتولید مقادیر آزمایشگاهی سطح مقطع در کل بازه انرژی فرودی نمی‌باشد. برای بهبود نتایج تلاش کرده‌ایم از طریق تغییر قدرت کشش سطحی میان دو هسته برهم‌کنشی و مینیمم‌سازی همخوانی میان داده‌های تئوری و تجربی سطح مقطع در این بازه، فرم اصلاح شده‌ای از مدل پتانسیل Prox. 2010 را معرفی نماییم. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش قدرت ضریب از 1.460734 به 2.06 درصد اختلاف نسبی میان داده‌های تئوری و تجربی سطح مقطع از $\chi = 58.79$ به $\chi = 23.49$ کاهش می‌یابد.



۵. مراجع:

- [1] Rinku Prajapat, Moumita Maiti, Rishabh Kumar, Malvika Sagwal, Gonika, Chandra Kumar, Rohan Biswas, J. Gehlot, S. Nath, and N. Madhavan, Phys. Rev. C **107**, 064616 (2023).
- [2] S. Sanila, A. M. Vinodkumar, B. R. S. Babu, N. Madhavan, S. Nath, J. Gehlot, Rohan Biswas, Chandra Kumar, Gonika, Anjali Rani, A. Parihari, Dinesh Viswakarma, Shoaib Noor, and E. Prasad, Phys. Rev. C **106**, 024614 (2022).
- [3] J. Blocki, J. Randrup, W. J. Swiatecki, and C. F. Tsang, Ann. Phys. (NY) **105**, 427 (1977).
- [4] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 044615 (2010).
- [5] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 064609 (2010).
- [6] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 047601 (2010).
- [7] K. Hagino, N. Rowley, and A. T. Kruppa, Comput. Phys. Commun. **123**, 143 (1999).
- [8] Amninderjeet Kaur et al., Nucl. Phys. A **1042**, 122791 (2024).