



بررسی سیستماتیک نقش اثرات دمایی بر روی روند پارامترسازی سدهای همجوشی

قرائی، رضا

دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده

مطالعه‌ی حاضر به بررسی سیستماتیک نقش اثرات دمایی در روند پارامترسازی سدهای همجوشی ۱۱۴ سیستم برخورد کننده‌ی مختلف (با شرط $3 \leq Z_1 Z_2 \leq 1520$) اختصاص دارد. محاسبات مربوط به پتانسیل برهم‌کنشی را با استفاده از آخرین نسخه‌ی پتانسیل مجاورت، یعنی Prox. 2010، انجام داده‌ایم. در این تحقیق، برای نخستین بار، روابط پارامترسازی شده‌ی وابسته به دمایی را برای ارتفاع و محل سد کولنی ارائه داده‌ایم که قادرند داده‌های تجربی را با دقت قابل قبولی بازتولید کنند. علاوه بر این، با مقایسه‌ی همزمان نتایج مربوط به نسخه‌های مستقل و وابسته به دمای پتانسیل به این نتیجه دست یافتیم که اعمال اثرات دمایی باعث افزایش توافق میان مقادیر پارامترسازی شده و تجربی ارتفاع سد همجوشی می‌گردد.

کلمات کلیدی: واکنش‌های همجوشی یون-سنگین، پارامترسازی سد همجوشی، اثرات دمایی، فرمالیزم مجاورت.

Systematic analysis of the role of thermal effects on the parametrization trend of the fusion barriers

Gharaei, Reza

Department of Physics, Sciences Faculty, Hakim Sabzevari University

Abstract

The present study is devoted to systematic analysis of the role of thermal effects on the parametrization trend of the fusion barriers for 114 colliding systems (with condition of $3 \leq Z_1 Z_2 \leq 1520$). The calculations of the interaction potential have been performed using the latest version of the proximity potential, namely Prox. 2010. We present, for the first time, a temperature-dependent pocket formula for height and position of the Coulomb barrier which reproduce the corresponding empirical data with acceptable accuracy. Moreover, using a simultaneous comparison between the results of the temperature-independent and -dependent forms of the potential we concluded that the imposing of the thermal effects enhances the agreement between the parametrized and empirical values of the fusion barrier height.

Keywords: Heavy-ion fusion reactions, parametrization of the fusion barrier, thermal effects, proximity formalism.

مقدمه:

تحقیق بر روی ویژگی‌های مربوط به کانال همجوشی کامل دو هسته‌ی برهم‌کنشی همواره از موضوعات جذاب و پرکاربرد فیزیک هسته‌ای بوده است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به اثرات تغییرشکل هسته‌ها،



تراکم‌ناپذیری ماده‌ی هسته‌ای و کشش سطحی اشاره نمود که در طول سال‌های اخیر نقش آنها بر روی ارتقاء نتایج مربوط به واکنش‌های همجوشی ارزیابی شده‌اند، بعنوان مثال مراجع [۱-۴]. از دیگر اثرات فیزیکی مهم در بحث واکنش‌های همجوشی اثر دمایی سیستم می‌باشد. یکی از پر کاربردترین فرمالیزم‌های تئوری که امکان آنالیز نقش این اثر فیزیکی را بر روی پتانسیل برهم‌کنشی و به تبع آن سطح مقطع همجوشی فراهم می‌آورد، دیدگاه "پتانسیل مجاورت" است. این پتانسیل که مبتنی بر نظریه‌ی نیروی مجاورت [۵] می‌باشد فرمالیزم نسبتاً ساده‌ای را برای محاسبه‌ی قدرت برهم‌کنش‌های هسته‌ای در طول فرایند همجوشی ارائه می‌دهد. نخستین نسخه‌ی پتانسیل مجاورت در سال ۱۹۷۷ معرفی شد که امروزه آن را با نام "Prox. 77" می‌شناسند. در طول سال‌های اخیر، بدلیل وجود پارامترهای قابل تنظیم در این مدل نسخه‌های ارتقاء یافته‌ای از فرمالیزم مجاورت ارائه شده‌اند [۶]. محققان در سال ۲۰۱۰ بر پایه‌ی تحلیل اثرات کشش سطحی در زمینه‌ی واکنش‌های همجوشی یون-سنگین، موفق به معرفی آخرین نسخه از این فرمالیزم با برجسب پتانسیل "Prox. 2010" شدند [۱]. خاطر نشان می‌شود که تاکنون نقش اثرات دمایی فرایند همجوشی بر روی نتایج تئوری حاصل از هر دو نسخه‌ی Prox. 77 و Prox. 2010 مورد بررسی قرار گرفته است [۷، ۸]. نتایج بدست آمده معلوم می‌کند که اعمال اثرات مذکور نقش بسزایی در بهبود نتایج تئوری پتانسیل و همچنین سطح مقطع همجوشی دارد. از دیگر موضوعات پرکاربرد در زمینه‌ی مطالعات تئوری فیزیک هسته‌ای پارامترسازی روند تغییرات مشخصه‌های سدهای همجوشی (یعنی ارتفاع سد V_B و محل سد R_B) برحسب کمیت‌های فیزیکی معنادار است که همزمان با محاسبات دقیق پتانسیل برهم‌کنشی در حال انجام است. از جمله‌ی این تلاش‌ها می‌توان به مطالعات انجام شده در مراجع [۹-۱۱] اشاره کرد که در آنها رفتار پارامترهای R_B و V_B حاصل از مدل‌های پتانسیل مختلف بصورت مستقیم برحسب کمیت‌های $A_P^{1/3} + A_T^{1/3}$ و $\frac{Z_P Z_T}{A_P^{1/3} + A_T^{1/3}}$ فرمولبندی شده‌اند. ذکر این نکته حائز اهمیت است وجود این روابط پارامترسازی شده که در اصطلاح "فرمول جیبی" نیز نامیده می‌شوند در درک ویژگی‌های واکنش‌های همجوشی در نواحی جرمی ناشناخته تأثیر بسزایی خواهد داشت. در مطالعه‌ی حاضر قصد داریم تا برای نخستین بار به تحلیل سیستماتیک نقش اثرات دمایی در روند پارامترسازی ارتفاع و محل سدهای همجوشی بپردازیم. برای این منظور، در ابتدا مقادیر دقیق این دو پارامتر را در چارچوب دیدگاه مجاورت و با استفاده از آخرین نسخه‌ی آن (یعنی Prox. 2010) برای ۱۱۴ واکنش همجوشی مختلف محاسبه نموده‌ایم که شرط $1520 \leq Z_1 Z_2 \leq 39$ برای هسته‌های شرکت‌کننده‌ی آنها صادق است. سپس براساس رویکرد معرفی شده در مرجع [۱۲]، سعی خواهیم نمود تا روند تغییرات مقادیر محاسبه شده‌ی R_B و V_B را از طریق روابطی که مستقیماً به دمای T سیستم وابسته هستند پارامترسازی نمائیم. در حقیقت، وجود چنین روابطی امکان پاسخ به



این سؤال را فراهم می‌آورد که روند پارامترسازی سدهای همجوشی و دقت فرمول‌های جیبی پیشنهادی تا چه اندازه متأثر از اثرات دمایی سیستم است؟

روش کار:

همانطوریکه که در بخش قبل نیز بدان اشاره شد، در مطالعه‌ی حاضر محاسبات مربوط به پتانسیل هسته‌ای $V_N(r)$ برای سیستم‌های همجوشی انتخابی براساس مدل Prox.2010 انجام داده‌ایم که در آن $V_N(r) = 4\pi\gamma b\bar{R}\Phi\left(\frac{s}{b}\right)$ باید توجه داشت که تعاریف بخش‌های مختلف این مدل شامل پارامتر شعاعی R ، ضخامت سطح b و تابع جهانی $\Phi(s/b)$ مشابه نسخه‌ی 77 Prox. می‌باشد [۶] و تنها تفاوت موجود مربوط به ضریب انرژی سطحی γ است که در حالت کلی به شکل زیر تعریف می‌گردد:

(۱)

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - K_s \left(\frac{N-Z}{N+Z} \right)^2 \right)$$

که در مدل Prox. 2010 ثابت‌های γ_0 و K_s به ترتیب دارای مقادیر MeV/fm^2 $1/460.734$ و 4 می‌باشند [۱]. به منظور اعمال اثرات دمایی در فرمالیزم مجاورت از دیدگاه معرفی شده در مرجع [۸] استفاده نموده‌ایم. در آن مطالعه مؤلفان با همانندسازی معادلات ترمودینامیکی و اندروالس برای محیط‌های شامل ماده‌ی هسته‌ای، موفق به معرفی فرم اصلاح شده‌ای از ضریب γ شده‌اند که بشکل زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma(T) = \gamma(T=0) \left[1 - \frac{T-T_B}{T_B} \right]^{3/2} \quad (2)$$

دقت شود که در این رابطه $\gamma(T=0)$ با استفاده از معادله‌ی (۱) قابل محاسبه است و T_B هم دمای معادل با انرژی اطراف سد می‌باشد [۸]. علاوه براین، برای تعیین دمای T سیستم برهم‌کنشی (برحسب MeV) می‌توانیم از رابطه‌ی (۱۰) مرجع [۸] بهره گرفت. با معلوم بودن پتانسیل هسته‌ای (با و بدون احتساب اثرات دمایی) و جمع آن با شکل ساده‌ای از پتانسیل کولنی (بصورت $V_C(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r$) قادر خواهیم بود پتانسیل برهم‌کنشی و در نتیجه مقادیر تئوری ارتفاع و محل سد همجوشی را برای واکنش‌های مختلف محاسبه نمائیم. پس از این مرحله به پارامترسازی رفتار مقادیر تئوری R_B بصورت غیرمستقیم و با استفاده از شعاع کاهش یافته‌ی $S_B (=R_B - C_1 - C_2)$ خواهیم پرداخت. در حقیقت، براساس رویکرد پیشنهادی در مرجع [۱۲] می‌بایست مقادیر S_B را برحسب $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$ رسم نمائیم.

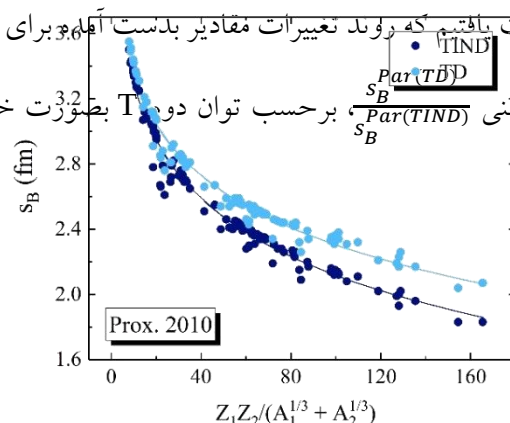
نتایج:



شکل (۱) روند تغییرات مقادیر بدست آمده‌ی شعاع کاهش یافته‌ی SB را براساس هر دو مدل مستقل و وابسته به دمای پتانسیل مجاورت در محدوده‌ی جرمی انتخابی ما نشان می‌دهد. نتایج حاصل آشکار می‌سازند که فارغ از انتخاب مدل پتانسیل رفتار این پارامتر برحسب کمیت $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$ بشکل غیرخطی و نزولی است. علاوه بر این، اعمال اثرات دمایی باعث افزایش مقادیر SB و در نتیجه جابجایی منحنی وابسته به دما (TD) نسبت به مستقل از دما (TIND) خواهد شد. درحالت کلی، روند تغییرات این پارامتر را بصورت زیر فرمول-بندی کرده‌ایم:

$$s_B^{\text{Par}} = \alpha \exp[-\beta(x-2)^{1/4}] \quad (3)$$

که در این روابط $x = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$ مقادیر استخراج شده برای ثابت‌های (α, β) در شرایط استفاده از مدل پتانسیل TIND برابر $(0.3026, 0.4860)$ و با فرض استفاده از مدل TD برابر $(0.2550, 0.51395)$ می‌باشند. با انجام مطالعات دقیق‌تر به این نتیجه دست یافتیم که روند تغییرات مقادیر بدست آمده برای نسبت SBهای پارامترسازی شده‌ی وابسته و مستقل از دما، یعنی $\frac{s_B^{\text{Par(TD)}}}{s_B^{\text{Par(TIND)}}$ ، برحسب توان دو $T^{3.2}$ خطی کاهش می‌یابند، شکل (۲) را ملاحظه نمایید.



شکل (۱): روند تغییرات پارامتر شعاع کاهش یافته‌ی SB برحسب $\frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$ مبتنی بر مدل‌های مستقل و وابسته به دمای Prox. 2010.

در این شرایط شخص می‌تواند تابع دمایی $f(T)$ با معادله‌ی زیر را بر مجموعه نقاط حاصله برازش کند:

$$\frac{s_B^{\text{Par(TD)}}}{s_B^{\text{Par(TIND)}}} = f(T) = aT^2 + b \quad (4)$$

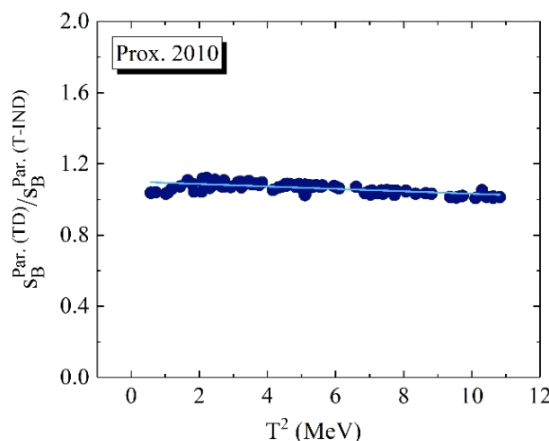
در این رابطه شیب a و عرض از مبدأ b به ترتیب دارای مقادیر -0.0061 و $1/0.926$ می‌باشند. حال براساس روابط (۳) و (۴)، برای دستیابی به یک فرمول واحد برای SB که صراحتاً وابسته به دما باشد می‌توان نوشت:

$$s_B^{\text{Par}}(x, T) = (\alpha \exp[-\beta(x-2)^{1/4}]) (aT^2 + b) \quad (5)$$



نهایتاً با توجه به تعریف شعاع کاهش یافته S_B ، رابطه‌ی پارامترسازی شده‌ی وابسته به دمایی را برای R_B به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$R_B^{Par}(x, T) = (\alpha \exp[-\beta(x-2)^{1/4}]) (aT^2 + b) + C_1 + C_2 \quad (۶)$$

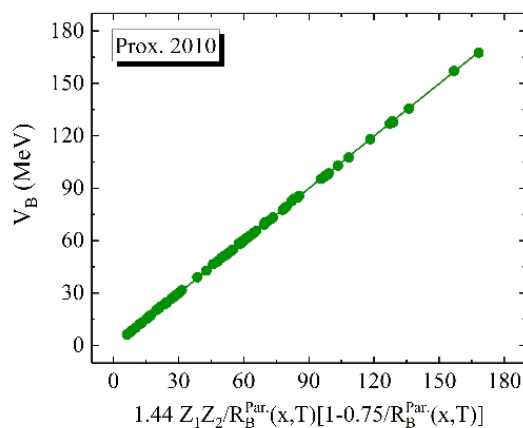


شکل (۲): مقادیر بدست آمده برای نسبت $S_B^{Par(TD)}/S_B^{Par(INDT)}$ برحسب توان دوم دمایی T براساس مدل Prox. 2010.

در این مرحله قصد داریم تا به پارامترسازی مقادیر تئوری ارتفاع سد همجوشی حاصل از مدل وابسته به دمایی Prox. 2010 پردازیم. برای دستیابی به این مقصود، نیاز است تا در ابتدا روند تغییرات مقادیر یاد شده را برحسب کمیت $\frac{1.44Z_1Z_2}{R_B^{Par}(x, T)} \left(1 - \frac{0.75}{R_B^{Par}(x, T)}\right)$ ارزیابی کنیم که در آن از طریق معادله‌ی (۶) قابل محاسبه است. نمایش این روند برحسب کمیت مذکور نشان می‌دهد که مقادیر بدست آمده برای پارامتر V_B دارای رفتاری خطی است، شکل ۳، که برای پارامترسازی آن رابطه‌ی دمایی زیر را پیشنهاد داده‌ایم:

$$V_B^{Par}(x, T) = \eta \left[\frac{1.44Z_1Z_2}{R_B^{Par}(x, T)} \left(1 - \frac{0.75}{R_B^{Par}(x, T)}\right) \right] \quad (۷)$$

که شیب این خط را به اندازه‌ی $\eta = 0.9982$ بدست آوردیم.



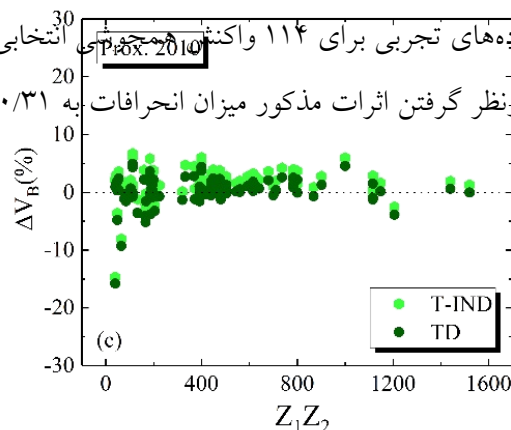
شکل (۳): رفتار مقادیر تئوری ارتفاع سد V_B برحسب $\frac{1.44Z_1Z_2}{R_B^{Par}(x, T)} \left(1 - \frac{0.75}{R_B^{Par}(x, T)}\right)$ برپایه‌ی مدل وابسته به دمایی Prox. 2010.



با انجام یک فرایند تحلیلی ساده می‌توان اثبات کرد که ارتفاع سدهای حاصل از مدل مستقل از دمای Prox. 2010 برحسب کمیت $\left(1 - \frac{0.75}{R_B^{Par}(x)}\right) \frac{1.44Z_1Z_2}{R_B^{Par}(x)}$ نیز دارای رفتاری خطی با شیب مثبت به اندازه $1/0.01105$ $\eta' =$ هستند. البته باید توجه داشت که در این بخش مقادیر $R_B^{Par}(x)$ وابستگی به پارامتر T ندارند و براساس تعریف $R_B^{Par} = s_B^{Par} + C_1 + C_2$ و معادله‌ی (۵) قابل محاسبه می‌باشند. در این مرحله به ارزیابی دقت روابط پارامترسازی شده‌ی پیشنهادی در پیش‌بینی داده‌های تجربی ارتفاع سد همجوشی و همچنین آگاهی از میزان تأثیر اثرات دمایی بر روی کیفیت آنها خواهیم پرداخت. برای این منظور درصد اختلاف نسبی میان مقادیر پارامترسازی شده و تجربی V_B را برای محدوده جرمی انتخابی خود از طریق تعریف زیر محاسبه می‌نماییم:

$$\Delta V_B(\%) = \frac{V_B^{Par} - V_B^{Emp}}{V_B^{Emp}} \times 100 \quad (۸)$$

در شکل (۴) مقادیر $\Delta V_B(\%)$ را که براساس دو رویکرد مستقل و وابسته به دمای پتانسیل مجاورت محاسبه شده‌اند را برحسب حاصلضرب Z_1Z_2 هسته‌های مختلف رسم نموده‌ایم. براساس نتایج حاصل از این شکل، متوسط انحراف‌های حاصله از داده‌های تجربی برای ۱۱۴ واکنش همجوشی انتخابی قبل از اعمال اثرات دمایی برابر $1/86\%$ است حال آنکه با در نظر گرفتن اثرات مذکور میزان انحرافات به $0/31\%$ کاهش می‌یابد.



شکل (۴): نسبت اختلاف نسبی میان مقادیر پارامترسازی شده و تجربی ارتفاع سد براساس دو مدل مستقل و وابسته به دمای Prox. 2010.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش کردیم تا نقش اثرات دمایی را در روند پارامترسازی ارتفاع‌ها و محل‌های سد همجوشی درک نماییم. برای منظور ۱۱۴ واکنش همجوشی را در محدوده‌ی $3 \leq Z_1Z_2 \leq 1520$ انتخاب کردیم و برای همگی آنها براساس مدل Prox. 2010 پتانسیل برهم‌کنشی را محاسبه نمودیم. برای اعمال اثرات دمایی از اصول ترمودینامیکی مبتنی بر دیدگاه واندروالس بهره گرفتیم. نتایج بدست آمده در این کار آشکار می‌سازند که فرمول‌های پیشنهادی برای پارامترسازی رفتار سدهای همجوشی قبل و بعد از اعمال اثرات دمایی قادرند



داده‌های تجربی ارتفاع سد همجوشی را با دقت خوبی بازتولید کنند. از سوی دیگر، ثابت شد که احتساب اثرات دمایی باعث بهبود نتایج و افزایش دقت فرمول‌های پیشنهادی می‌گردد.

مرجع‌ها

- [1] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 047601 (2010).
- [2] O. N. Ghodsi and V. Zanganeh, Nucl. Phys. A **846**, 40, (2010).
- [3] S. Misicu and H. Esbensen, Phys. Rev. C **75**, 034606 (2007).
- [4] R. Gharaei, J. Phys. G Nucl. Part. Phys. **44**, 045108 (2017).
- [5] J. Blocki *et al.*, Ann. Phys. (NY) **105**, 427 (1977).
- [6] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 064609 (2010).
- [7] O. N. Ghodsi and R. Gharaei, Phys. Rev. C **88**, 054617 (2013).
- [8] M. Salehi and O. N. Ghodsi, Chin. Phys. Lett. **30**, 042502 (2013).
- [9] W. W. Qu, G.L. Zhang, X.Y. Le, Nucl. Phys. A **868**, 1 (2011).
- [10] Y. Jie-Cheng, Z. Gao-Long, P. Dan-Yang, Chin. Phys. C **38**, 034101 (2014).
- [11] N. K. Dhiman, R.K. Puri, Acta Phys. Pol. B **37**, 1855 (2006).
- [12] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 064608 (2010).