



بررسی سیستماتیک اثرات ضرایب انرژی سطحی بر روی رفتار ایزوتوپی سدهای همجوشی

قرائی، رضا* - مولوی، علی اصغر - کریمی مقدم، محسن

دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

در این مطالعه تلاش خواهیم کرد تا با بهره‌گیری از چارچوب مدل پتانسیل مجاورت، برای نخستین بار، به بررسی نقش اثرات کشش سطحی بر روی رفتار ایزوتوپی ارتفاع و محل سدهای همجوشی ۲۰۷ سیستم ایزوتوپی مختلف با خاصیت فزونی نوترون ($1 \leq N/Z \leq 1.574$) بپردازیم. برای دستیابی به این هدف، پتانسیل‌های برهم‌کنشی را با لحاظ کردن شش مجموعه از ضرایب (γ_0, k_s) در نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت محاسبه کرده و روابط پارامترسازی شده‌ای را برای ارتفاع‌ها و محل‌های سد همجوشی ارائه داده‌ایم که علاوه بر نسبت N/Z مستقیماً به ضریب انرژی سطحی γ نیز وابسته‌اند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که حساسیت رفتار ایزوتوپی محل و ارتفاع سدهای همجوشی با افزایش اثرات کشش سطحی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند.

کلمات کلیدی: رفتار ایزوتوپی ارتفاع و محل سد همجوشی، اثرات ضریب انرژی سطحی، فرمالیسم مجاورت

Systematic analysis of the effects of the surface energy coefficients on the isotopic behavior of the fusion barriers

Gharaei, Reza; Mowlavi, Ali Asghar; Karimi Moghaddam, Mohsen

Department of Physics, Sciences Faculty, Hakim Sabzevari University

Abstract:

Within the framework of the proximity potential model, for the first time, we have studied the role of surface tension effects in the isotopic behavior of the height and position of the fusion barriers of 207 different isotopic systems with neutron rich compound nuclei ($1 \leq N/Z \leq 1.574$). To reach this aim, we have calculated the interactions potentials by entering six sets of (γ_0, k_s) coefficients in the original version of the proximity potential and have presented the parameterized formulas for fusion barrier heights and positions which simultaneously depend on the N/Z ratio and surface energy coefficient γ . The obtained results reveal that the sensitivity of the isotopic behaviors of the position and height of the fusion barriers increases and decreases by increasing the surface tension effects, respectively.

Keywords: Isotopic behavior of the fusion barrier heights and positions, Surface energy coefficient effects, Proximity formalism

مقدمه:

از نقطه نظر تئوری، یکی از ابزارهای کارآمد در تحلیل واکنش‌های همجوشی پتانسیل برهم‌کنشی میان هسته‌های هدف و پرتابه است. همانطور که می‌دانیم، این پتانسیل را می‌توان بصورت برهم‌نهی دو بخش کولنی و هسته‌ای در نظر گرفت که در شرایط کلی تقابل میان این دو نوع برهم‌کنش موجب شکل‌گیری سدی با ارتفاع معین در مقابل هسته‌های



برخوردکننده می‌شود. از آنجائیکه شناخت ما از برهم کنش‌های کولنی میان دو هسته در طی فرایند همجوشی در حد مطلوب است، برای دستیابی به مقادیر عددی ویژگی‌های سد پتانسیل (نظیر ارتفاع و محل آن) تنها نیازمند به در اختیار داشتن مدلی مناسب برای محاسبه بخش هسته‌ای پتانسیل کل هستیم. پتانسیل مجاورت [۱] یکی از مدل‌های ساده و در عین حال کاربردی برای تخمین قدرت این بخش در سیستم‌های همجوشی مختلف می‌باشد. نخستین نسخه از این پتانسیل در سال ۱۹۷۷ و برپایه‌ی "نظریه‌ی مجاورت" [۱] معرفی شد که امروزه آنرا با نام "Proximity 1977 (Prox.)" (77 می‌شناسند. با وجود امکان محاسبه دقیق قدرت پتانسیل بر هم‌کنشی اما یکی از زمینه‌های تحقیقاتی به روز در بحث واکنش‌های همجوشی، معرفی فرم‌های پارامترسازی شده‌ی مناسب برای محاسبه مقادیر ارتفاع و محل سد کولنی (V_B و R_B) برحسب کمیت‌های معنادار مختلف می‌باشد. بطورکلی، این روابط پارامترسازی شده از دو جهت می‌تواند کارایی داشته باشند: یکی رهایی یافتن از محاسبات تحلیلی که بعضاً پیچیدگی زیادی داشته و دیگری تعمیم رفتار مقادیر تئوری R_B و V_B به نواحی جرمی از هسته‌ها که هنوز ناشناخته مانده‌اند. محققان تاکنون با بکارگیری روش‌های تئوری متنوع توانسته‌اند روابط کارایی را برای پارامترسازی مقادیر مذکور در محدوده‌های جرمی مختلف ارائه دهند، بعنوان مثال مراجع [۴-۲] را ملاحظه نمائید.

در طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی نیز بر روی وابستگی ایزوتوپی ویژگی‌های سد همجوشی صورت گرفته است [۵-۷]. اساس آن تحقیقات بررسی رفتار پارامترهای ارتفاع و محل سد همجوشی برحسب نسبت N/Z هسته‌ی مرکب در سیستم‌های برخوردکننده شامل ایزوتوپ‌های گوناگون می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقادیر هر یک از این کمیت‌ها با اضافه کردن نوترون به هسته‌های هدف یا پرتابه از یک رفتار ایزوتوپی مشخص تبعیت می‌کنند. یک شخص می‌تواند رفتار ویژگی‌های مختلف سد همجوشی و همچنین سطح مقطع‌های همجوشی در انرژی‌های مختلف را برحسب نسبت N/Z هسته‌ی مرکب فرمول‌بندی کند. اخیراً، در چارچوب پتانسیل مجاورت، نقش اثرات ضریب انرژی سطحی γ و دمای T در روند پارامترسازی سدهای همجوشی ارزیابی شده است [۸]. در آن تحقیق، برای نخستین بار، فرمول‌هایی جیبی را برای ارتفاع و محل‌های سد همجوشی ۱۱۴ واکنش مختلف با شرط $1520 \leq Z_p Z_t \leq 39$ ارائه دادیم که مستقیماً به ضریب γ و دمای T سیستم وابسته است. نتایج بدست آمده آشکار می‌سازد که فرمول‌های پیشنهادی قادرند داده‌های تئوری و تجربی R_B و V_B را در واکنش‌های مورد مطالعه با دقت خوبی بازتولید کنند.

با توجه به اهمیت نقش اثرات کشش سطحی در واکنش‌های همجوشی، در مطالعه‌ی حاضر بر آن شدیم تا برای نخستین بار به بررسی نقش ضریب γ در رفتار ایزوتوپی ویژگی‌های سد همجوشی (ارتفاع و محل سد) بپردازیم. برای این منظور، در گام نخست قصد داریم تا با استفاده از چهار مجموعه‌ی مختلف از ضرایب (γ_0, k_s) ، مقادیر ارتفاع و محل سد همجوشی را در ۲۰۷ واکنش همجوشی مختلف برپایه‌ی نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت محاسبه کنیم. در ادامه با تکیه بر یک



رویکرد تحلیلی مناسب تلاش خواهیم کرد تا روابطی را برای تغییرات ارتفاع و محل سد همجوشی ارائه دهیم که علاوه بر نسبت N/Z به ضریب انرژی سطحی γ نیز وابسته باشند. خاطر نشان می‌کنیم که واکنش‌های مورد مطالعه شامل ۳۷ سیستم ایزوتوپی با ایزوتوپ‌های مختلف $O, Al, Sm, Nd, Sn, Ni, S, Zr, Pd, Pb, Cl, Ti, Ca, Mg, Si, Ar, He, U, Bi, C$ ، بعنوان هسته‌های هدف و پرتابه می‌باشند که نسبت به مطالعات گذشته در محدوده‌ی جرمی وسیع‌تری قرار دارند. علاوه بر این، هسته‌های مرکب شکل گرفته در این واکنش‌ها همگی عناصری با خاصیت فزونی نوترون ($N/Z \leq 1/574$) هستند.

روش کار:

باید بدانیم که ضریب انرژی سطحی γ یکی از تاثیرگذارترین بخش‌های فرمالیزم پتانسیل مجاورت است. تاکنون نقش این ضریب بر روی واکنش‌های همجوشی و یا حتی فرایندهای فیزیکی دیگر نظیر واپاشی‌های آلفا و واپاشی‌های خوشه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است [۹]. برطبق چارچوب شرح داده شده در مرجع [۱] می‌توان دید که قدرت پتانسیل هسته‌ای در نسخه‌ی اصلی فرمالیزم مجاورت بطور مستقیم به ضریب γ وابسته است، $V_N(r) = 4\pi\gamma b \bar{R} \Phi(r)$. از طرفی برطبق تعریف $\gamma = \gamma_0(1 - k_s A_s^2)$ ، برای محاسبه‌ی مقادیر این ضریب در واکنش‌های همجوشی مختلف نیاز است تا از مقادیر ثابت‌های γ_0 و k_s اطلاع داشته باشیم. تحت این شرایط، با انتخاب مجموعه‌های مختلفی از این دو ثابت قادر خواهیم بود قدرت ضریب انرژی سطحی و در نتیجه قدرت پتانسیل هسته‌ای در فرمالیزم مجاورت را تغییر دهیم. در تحقیق حاضر چهار مجموعه از ثابت‌های (γ_0, k_s) را بصورتی که در جدول (۱) معرفی شده‌اند برای بررسی نقش اثرات ضریب انرژی سطحی در رفتار ایزوتوپی ارتفاع و محل سد همجوشی برگزیده‌ایم. از طرفی در گام نخست قصد داریم به مطالعه‌ی سیستم‌های همجوشی‌ای پردازیم که دارای خاصیت فزونی-نوترون باشند. بنابراین، ۲۰۷ واکنش همجوشی (شامل ۳۷ سیستم ایزوتوپی) مختلف را با شرط $1 \leq N/Z \leq 1/574$ برای نسبت تعداد نوترون‌ها به پروتون‌های هسته‌های مرکب آنها انتخاب کرده‌ایم. با اعمال هر یک از این مجموعه‌های انتخابی (γ_0, k_s) در فرمالیزم پتانسیل 77 Prox. به نوعی می‌توان پتانسیل هسته‌ای را در مجموع ۲۰۷ واکنش ایزوتوپی برپایه‌ی چهار مدل اصلاح شده از پتانسیل مجاورت محاسبه کرد. با اضافه کردن بخش کولنی به هر یک از پتانسیل هسته‌ای بدست آمده، محاسبه‌ی پتانسیل برهم‌کنشی کل و در نتیجه محل و ارتفاع سد همجوشی (R_B, V_B) در هر یک از سیستم‌های ایزوتوپی امکان پذیر خواهد بود. لازم به ذکر است که در جدول (۱) مقدار میانگین ضریب γ برای مجموع ۲۰۷ واکنش انتخابی براساس هر یک از مجموعه‌های (γ_0, k_s) نیز ارائه شده است. مقایسه مقادیر محاسبه شده‌ی γ_{ave} و ثابت γ_0 در هر مجموعه آشکار می‌سازد که در نهایت این دو پارامتر از نظر مقداری اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و به نوعی استفاده از شرط $\gamma \approx \gamma_0$ برای هر کدام از



مجموعه‌های γ -PD2003، γ -MS66، γ -MN81 و γ -MN76 قابل توجه می‌باشد. پس از محاسبه‌ی مقادیر ارتفاع و محل سدهای همجوشی براساس مدل پتانسیل Prox. 77 همراه با مجموعه‌های مختلف از ضریب انرژی سطحی γ ، از روابط زیر برای دستیابی به درک صحیح از رفتار ایزوتوپی این مقادیر در محدوده‌ی واکنش‌های همجوشی انتخابی بهره گرفته‌ایم،

$$\Delta R_B(\%) = \frac{R_B - R_B^0}{R_B^0} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta V_B(\%) = \frac{V_B - V_B^0}{V_B^0} \times 100 \quad (2)$$

که در آن‌ها R_B^0 و V_B^0 به ترتیب بیان‌کننده‌ی محل و ارتفاع سد همجوشی در واکنشی است که نسبت N/Z آن برابر با یک باشد.

جدول (۱) مقادیر مربوط به پارامترهای γ_0 و k_s و مقدار متوسط γ مرتبط با چهار مجموعه‌ی انتخابی.

set	γ_0 (MeV.fm ⁻²)	k_s	γ_{ave} (MeV.fm ⁻²)	مرجع
γ -PD2003	۰,۹۱۸۰	۰,۷۵۴۶	۰,۹۱۰۲	[۱۰]
γ -MS66	۱,۰۱۷۳۴	۱,۷۹	۰,۹۹۶۸۴	[۱۱]
γ -MN81	۱,۲۷۳۲۶	۲,۵	۱,۲۳۷۵۹	[۱۲]
γ -MN76	۱,۴۶۰۷۳۴	۴,۰	۱,۳۹۵۲۶	[۱۳]

در حقیقت، ملاک ما برای بررسی رفتار مقادیر تئوری ویژگی‌های سد همجوشی برحسب نسبت N/Z در هر مجموعه از سیستم‌های ایزوتوپی واکنشی است که از لحاظ تعداد نوترون‌ها و پروتون‌ها متقارن باشد. لازم به ذکر است که چنانچه برای یک سیستم ایزوتوپی مشخص مقادیر ارتفاع و محل سد در مورد واکنش با $N/Z=1$ معلوم نباشد، می‌توان از برونیابی رفتار این مقادیر میان واکنش‌های معلوم آن سیستم استفاده کرد.

نتایج:

می‌دانیم که ارتفاع سد پتانسیل با افزایش تعداد نوترون‌ها و در نتیجه افزایش جاذبه‌ی هسته‌ای در سیستم‌های ایزوتوپی مختلف کاهش یابد. تحت این شرایط محل سد همجوشی افزایش خواهد یافت. این در حالی است که آنالیز مقادیر $\Delta R_B(\%)$ و $\Delta V_B(\%)$ حاصل از چهار نسخه‌ی مختلف پتانسیل مجاورت برحسب کمیت $N/Z-1$ نشان می‌دهد که روند افزایشی این مقادیر در محدوده‌ی سیستم‌های با شرط $N/Z \geq 1$ (خاصیت فزونی نوترون) بصورت منظم می‌باشد. این موضوع را براحتی می‌توان از نتایج نمایش داده شده در شکل (۱) برای پتانسیل Prox. 77 با دو نسخه‌ی γ -PD2003 و γ -



MN76، بعنوان نمونه، درک کرد. در این مطالعه، برای پارامترسازی رفتارهای ایزوتوپی منظم مشاهده شده در مورد درصد اختلاف پارامترهای محل و ارتفاع سد همجوشی از روابط زیر بهره گرفتیم،

$$\Delta R_B(\%) = \alpha \left(\frac{N}{Z} - 1 \right) \quad (3)$$

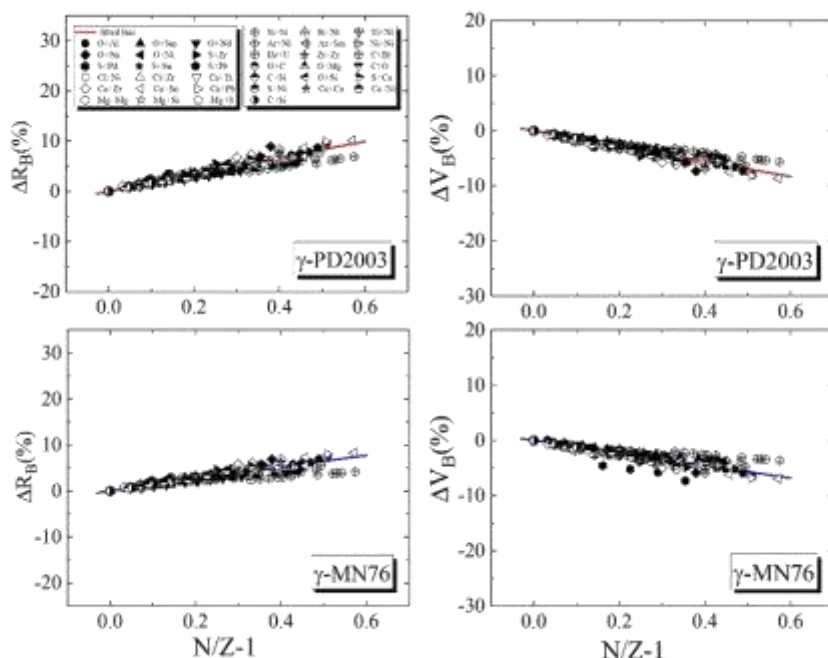
$$\Delta V_B(\%) = \beta \left(\frac{N}{Z} - 1 \right) \quad (4)$$

که مقادیر استخراج شده برای هر کدام از ثابت‌های α و β برپایه‌ی چهار مدل پتانسیل مورد بحث در جدول (۲) لیست شده‌اند.

جدول (۲) لیست مقادیر بدست آمده برای ثابت‌های α و β ، روابط (۳) و (۴)، براساس نتایج حاصل از پتانسیل مجاورت با چهار مجموعه‌ی انتخابی از ضرایب انرژی سطحی.

set	α	β
γ -PD2003	۱۶,۶۲۰	-۱۳,۸۵۷
γ -MS66	۱۵,۵۰۳	-۱۳,۰۵
γ -MN81	۱۴,۳۵۷	-۱۲,۲۳۸
γ -MN76	۱۲,۹۲۰	-۱۱,۳۴۶

لازم به ذکر است که مشابه چنین نتایجی با دیگر مدل‌های پتانسیل نیز گزارش شده است، بعنوان مثال می‌توان به مطالعاتی که با مدل وابسته به چگالی اسکریم انجام شده اشاره کرد [۵, ۶]. وجه تمایز مطالعه‌ی حاضر با دیگر تحقیقات صورت گرفته در آن است که ما برای نخستین بار تلاش کرده‌ایم تا روابطی را برای پارامترسازی رفتارهای ایزوتوپی ارتفاع و محل سد همجوشی ارائه دهیم که علاوه بر نسبت N/Z به ضریب انرژی سطحی γ نیز بطور مستقیم وابسته باشد. برای دستیابی به این هدف به آنالیز مقادیر بدست آمده برای ثابت α و β می‌پردازیم.

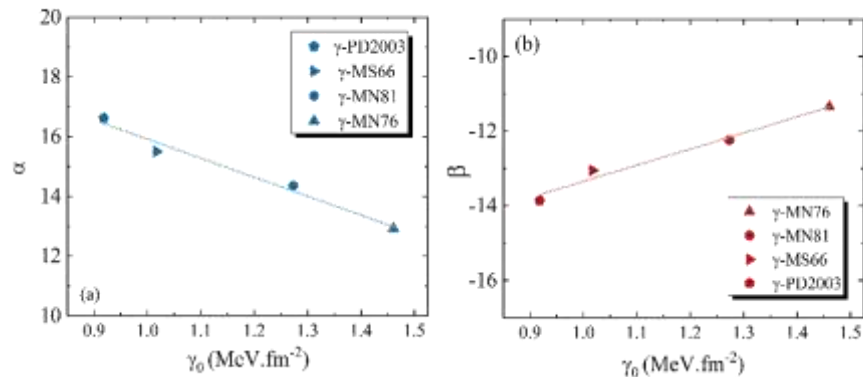


شکل (۱) روند تغییرات مقادیر محل سدهای همجوشی (شکل‌های سمت چپ) و ارتفاع‌های سد همجوشی (شکل‌های سمت راست) برحسب $N/Z-1$ برای دو مجموعه‌ی دلخواه γ -PD2003 و γ -MN76.

بر اساس داده‌های گزارش شده در جدول (۲) می‌توان دریافت که بیشترین شیب خط در مورد رفتار ایزوتوپی ارتفاع و محل سد همجوشی به ترتیب به نتایج حاصل از مجموعه‌های γ -PD2003 و γ -MN76 اختصاص دارد. این در حالی است که کمترین مقادیر شیب بدست آمده برای این رفتارها به ترتیب به مجموعه‌های γ -PD2003 و γ -MN76 اختصاص دارند. از طرفی، نگاه دقیق به نتایج این جدول آشکار می‌سازد که با افزایش قدرت ثابت γ_0 از مجموعه γ -PD2003 تا γ -MN76، ثابت‌های α و β ممکن است دارای رفتاری سیستماتیک باشند. برای اطمینان از وجود چنین رفتاری در شکل (۲) مقادیر تعیین شده برای این دو ثابت را برحسب ضریب γ_0 رسم کرده‌ایم. همانگونه که مشاهده می‌گردد ضرایب موجود در معادلات (۳) و (۴) با افزایش ثابت γ_0 به ترتیب از یک روند خطی کاهشی و افزایشی منظم تبعیت می‌کنند که برای فرمول‌بندی آنها از روابط پیشنهادی زیر بهره گرفته‌ایم،

$$\alpha(\gamma_0) = -6.362 \gamma_0 + 22.276 \quad (5)$$

$$\beta(\gamma_0) = 4.325 \gamma_0 - 17.672 \quad (6)$$



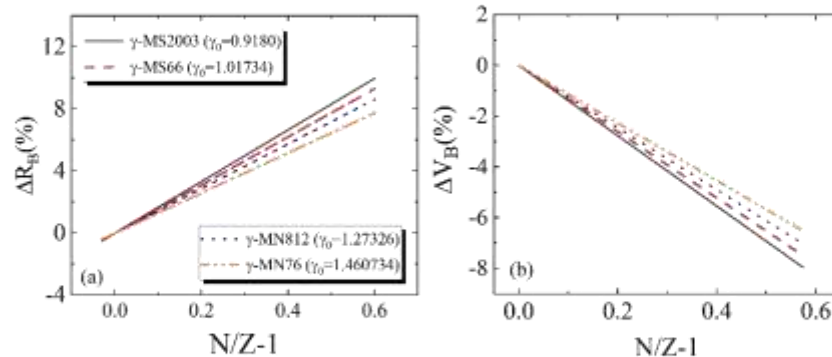
شکل (۲) رفتار مقادیر استخراج شده برای ثابت‌های الف (α و β)، روابط (۳) و (۴)، برحسب ضریب γ_0 براساس چهار نسخه‌ی انتخابی ضریب انرژی سطحی.

با در نظر گرفتن چنین وابستگی برای ضرایب α و β ، روابط پارامترسازی شده‌ی (۳) و (۴) می‌توانند به شکل نهایی زیر ارتقاء یابند،

$$\Delta R_B \left(\frac{N}{Z}, \gamma_0 \right) (\%) = (-6.362\gamma_0 + 22.276) \left(\frac{N}{Z} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\Delta V_B \left(\frac{N}{Z}, \gamma_0 \right) (\%) = (4.325\gamma_0 - 17.672) \left(\frac{N}{Z} - 1 \right) \quad (8)$$

با کمک این دو رابطه، در شکل (۳) روند تغییرات کمیت‌های ΔV_B و ΔR_B بصورت تابعی از $N/Z-1$ به ازای مقادیر مختلف میانگین ثابت انرژی سطحی در هر یک از چهار مجموعه انتخابی رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد در مورد روند تغییرات محل‌های سد همجوشی کمترین شیب خطوط اختصاص دارد به مجموعه‌ی γ -PD2003 با مقدار میانگین حداقل $\gamma_{ave} = 0,9102 \text{ MeV.fm}^{-2}$ ، در حالی که بیشترین شیب خطوط به مجموعه‌ی γ -MN76 با مقدار میانگین حداکثر $\gamma_{ave} = 1,39526 \text{ MeV.fm}^{-2}$ اختصاص دارد. در مقابل شرایط برای روند تغییرات ارتفاع‌های سد همجوشی عکس این است. یعنی، مجموعه‌ی γ -PD2003 و γ -MN76 به ترتیب بیشترین و کمترین شیب را برای تغییرات ΔV_B فراهم می‌کنند. این نتایج به نوعی نشان دهنده‌ی آن است با افزایش اثرات کشش سطحی سیستم‌های برهم‌کنشی حساسیت تغییرات ایزوتوپی محل و ارتفاع سد نسبت به ضریب γ به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند



شکل (۳) رفتار مقادیر حاصله برای ΔR_B و ΔV_B برحسب روابط پیشنهادی (۷) و (۸) برای چهار مجموعه‌ی انتخابی از ضریب انرژی سطحی γ .

بحث و نتیجه گیری:

با مطالعه بر روی ۲۰۷ واکنش ایزوتوپی مختلف که در شرط $1 \leq N/Z \leq 1/074$ صدق می‌کنند، نقش اثرات ضریب انرژی سطحی فرمالیزم مجاورت را بر روی روند ایزوتوپی ارتفاع و محل سد همجوشی مورد بررسی قرار دادیم. برای این منظور، با انتخاب چهار مجموعه از ضرایب (γ_0, k_s) و اعمال آنها در نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت رفتار مقادیر حاصل برای این پارامترها را برحسب نسبت N/Z سیستم‌های ایزوتوپی مختلف فرمول‌بندی کردیم. نتایج بدست آمده روابط پارامتر سازی شده‌ای را برای ویژگی‌های سد همجوشی پیشنهاد می‌دهند که مستقیماً به ضریب انرژی سطحی وابسته‌اند. علاوه بر این، برپایه‌ی مشاهدات شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که هر اندازه قدرت ضریب γ افزایش یابد وابستگی تغییرات ارتفاع و محل سد همجوشی نسبت به کمیت N/Z به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند.

مراجع:

- [1] J. Blocki *et al.*, Ann. Phys. (NY) **105**, 427 (1977).
- [2] O. N. Ghodsi and R. Gharaei, Phys. Rev. C **86**, 024615 (2012).
- [3] I. Dutt and R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, 064608 (2010).
- [4] Y. Jie-Cheng *et al.*, Chin. Phys. C **38**, 034101 (2014).
- [5] R. K. Puri, M. K. Sharma, R. K. Gupta, Eur. Phys. J. A **3**, 277 (1998).
- [6] R. K. Puri and N. K. Dhiman, Eur. Phys. J. A **23**, 429 (2005).
- [7] O. N. Ghodsi and R. Gharaei, Eur. Phys. J. A **48**, 21 (2012).
- [8] R. Gharaei and A. Hadikhani, Eur. Phys. J. A **53**, 147 (2017).
- [9] N. S. Rajeswari *et al.*, Eur. Phys. J. A **54**, 156 (2018).
- [10] K. Pomorski and J. Dudek, Phys. Rev. C **67**, 044316 (2003).
- [11] W. D. Myers and W. J. Swiatecki, Nucl. Phys. **81**, 1 (1966).



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران
۲۰۱ اسفندماه ۱۳۹۲ - دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)



- [12] P. Möller and J. R. Nix, Nucl. Phys. A **361**, 117 (1981).
[13] P. Möller and J. R. Nix, Nucl. Phys. A **272**, 502 (1976).