

## نقش کشتش سطحی بر روی سطح مقطع‌های واکنش همجوشی با پرتابه

## ضعیف پیوند

امید ناصرقدسی<sup>۱</sup>، سید امین سیدی<sup>۲\*</sup>، طاهره قاسمی<sup>۱</sup><sup>۱</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران<sup>۲</sup> دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸ ویرایش نهائی: ۱۳۹۶/۰۳/۰۷ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

## چکیده

در این مطالعه، با توجه به اثرات کشتش سطحی و شکست پرتابه قبل از رسیدن به آستانه همجوشی، به بررسی واکنش همجوشی با هسته ضعیف پیوند پرداخته‌ایم. در بررسی پتانسیل هسته‌ای این واکنش، از پتانسیل مجاورت، نسخه AW95 استفاده شده است. با استفاده از این مدل، که اثرات کشتش سطحی در آن لحاظ شده است و مدل دینامیکی سه جسمی، مسیریابی کلاسیکی سطح مقطع همجوشی کامل و ناکامل مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که از بین چهار پارامتر کشتش سطحی  $\gamma$ -MS،  $\gamma$ -MN1976،  $\gamma$ -MN1995 و  $\gamma$ -MSNew پتانسیل کولنی مربوط به مدل با کشتش سطحی  $\gamma$ -MS کم‌ترین عمق و محاسبات مربوط به مدل با کشتش سطحی  $\gamma$ -MN1976 بیش‌ترین عمق را برای پتانسیل کل در نواحی داخلی تولید می‌کنند، در حالی که پتانسیل حاصل از  $\gamma$ -MN1976 از لحاظ ارتفاع سد کولنی با داده تجربی توافق خوبی دارد. هم‌چنین سطح مقطع همجوشی کامل محاسبه شده با استفاده از مدل با کشتش سطحی  $\gamma$ -MS با داده‌های تجربی توافق بهتری دارد، در حالی که با استفاده از پارامتر  $\gamma$ -MN1976 سطح مقطع همجوشی ناکامل این اندرکنش، داده‌های تجربی را به‌خوبی بازتولید می‌کند.

**کلیدواژگان:** هسته‌های ضعیف پیوند، کشتش سطحی، پتانسیل‌های مجاورت، سطح مقطع‌های کامل و ناکامل همجوشی

## مقدمه

پرتابه به‌سمت هسته هدف پیش می‌رود، قبل از رسیدن به شعاع سد کولنی به اجزاء مختلف شکسته شود که این حالت را پدیده شکست می‌نامند. اندرکنش مربوط به همجوشی این هسته‌های ضعیف پیوند از طریق کانال‌های زیر دنبال می‌شود: ۱- همجوشی کامل مستقیم<sup>۲</sup>، یعنی اندرکنشی که در آن پرتابه بدون شکست ولی به‌صورت کامل با هسته هدف برخورد کرده و واکنش می‌دهد، ۲- همجوشی کامل هم‌زمان<sup>۳</sup> که در آن پرتابه شکسته شده ولی تمام اجزای شکست به‌طور کامل با هسته هدف واکنش می‌دهند به‌همین منظور جمع دو

در دهه اخیر، یک موضوع جالب در فیزیک هسته‌ای که توجه بسیاری از دانشمندان را از لحاظ نظری و تجربی به‌خود جلب کرده است، همجوشی پرتابه ضعیف پیوند<sup>۱</sup> پایدار با هسته‌های هدف متوسط و سنگین بوده است [۱۳-۱]. اهمیت این هسته‌های ضعیف پیوند در مطالعه ساختارهای هسته‌ای و نیز اختر فیزیک و ستاره‌شناسی است. هسته‌هایی مانند  ${}^9\text{Be}$  و  ${}^{6,7}\text{Li}$  را ضعیف پیوند می‌نامند چون انرژی آستانه پیوندی پایینی دارند. به‌همین دلیل این امکان وجود دارد که وقتی پرتویی از هسته‌های ضعیف پیوند به‌عنوان

\* نویسنده مسئول: amin.seyyedi@gmail.com

<sup>1</sup> Weakly Bound Projectile<sup>2</sup> Direct Complete Fusion (DCF)<sup>3</sup> Sequential Complete Fusion (SCF)

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

می‌گیریم که داده‌های تجربی مربوط به سطح مقطع آن اخیراً ارائه شده است [۲۱]. در ادامه، ابتدا محاسبه پتانسیل اندرکنشی کل مربوط به واکنش را ارائه می‌کنیم. بعد از آن، اثر پارامترهای مختلف کَشش سطحی را بر روی آن نشان می‌دهیم و سپس در مورد مدل مسیریابی کلاسیکی توضیح داده و در پایان نتایج این بررسی‌ها را بر روی سطح مقطع‌های همجوشی کامل و ناکامل بررسی می‌کنیم.

### پتانسیل اندرکنشی کل

پتانسیل کل بین پرتابه و هسته هدف شامل مجموع سه عبارت پتانسیل هسته‌ای، پتانسیل کولنی و پتانسیل مداری است [۱۹].

$$V_T(r) = V_N(r) + V_C(r) + V_I(r) \quad 1$$

پتانسیل کولنی و مداری به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_C(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad 2$$

$$V_I(r) = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2} \quad 3$$

در روابط فوق،  $Z_1$  و  $Z_2$  به ترتیب اعداد اتمی هسته پرتابه و هدف می‌باشند. اندازه حرکت زاویه‌ای  $l$  در رابطه<sup>۳</sup> بیانگر اندازه حرکت مداری و  $\mu$  جرم کاهشدهنده است. محاسبه دو عبارت ۲ و ۳ با دقت بالایی صورت می‌گیرد. اما برای محاسبه پتانسیل هسته‌ای مدل‌های متفاوتی وجود دارد که یکی از مهمترین آنها مدل مجاورت<sup>۵</sup> است که نسخه‌های متفاوت آن در مراجع مختلف معرفی شده است [۲۲]. در این تحقیق، از

فرآیند فوق را همجوشی کامل<sup>۱</sup> می‌نامند، ۳-همجوشی ناکامل<sup>۲</sup>، که در آن پرتابه شکسته شده و فقط یک بخش از آن با هسته هدف واکنش می‌دهد و بخش دیگر از محل واکنش دور شده و همجوشی انجام نمی‌دهد. جمع همجوشی کامل و همجوشی ناکامل را همجوشی کل<sup>۳</sup> می‌نامند، ۴- شکست بدون گیراندازی<sup>۴</sup> که در آن پرتابه شکسته شده ولی هیچ کدام از اجزای شکست با هسته هدف اندرکنش ندارند.

برای بررسی اندرکنش‌های مربوط به همجوشی پرتابه ضعیف پیوند از دو رهیافت استاتیکی و دینامیکی استفاده می‌شود. رهیافت استاتیکی به مطالعه شکل و نحوه محاسبه پتانسیل اندرکنش به خصوص پتانسیل هسته‌ای می‌پردازد، درحالی‌که رهیافت دینامیکی علاوه بر موارد فوق، در مورد اثرات شکست نیز بحث می‌کند [۱۷-۱۴]. در مطالعه‌ای که اخیراً صورت گرفته است به بررسی موضوع فوق از دیدگاه استاتیکی پرداخته شده است [۱۸]. با توجه به نتایج به دست آمده در آن تحقیق، لحاظ کردن اثرات شکست پرتابه در مطالعه واکنش با هسته‌های ضعیف پیوند ضروری است. لذا در این مطالعه، با استفاده از دیدگاه دینامیکی و با در نظر گرفتن اثرات شکست سعی داریم به بررسی اثر پارامترهای مختلف کَشش سطحی بر روی پتانسیل اندرکنشی و سطح مقطع‌های همجوشی کامل و ناکامل واکنش با پرتابه ضعیف پیوند  ${}^9\text{Be}$  پردازیم. برای این منظور از مدل پتانسیل مجاورت نسخه AW95 استفاده می‌کنیم [۱۹]. همچنین برای محاسبه سطح مقطع همجوشی از مدل سه جسمی مسیریابی کلاسیکی استفاده شده است. این مدل سه جسمی توانایی محاسبه جداگانه سطح مقطع‌های همجوشی کامل و ناکامل را دارا است [۲۰]. در این تحقیق، همجوشی  ${}^9\text{Be} + {}^{186}\text{W}$  را در نظر

<sup>4</sup> No Capture Breakup (NCBU)

<sup>5</sup> Proximity

<sup>1</sup> Complete Fusion (CF)

<sup>2</sup> Incomplete Fusion (ICF)

<sup>3</sup> Total Fusion (TF)

## نقش کشش سطحی بر روی پتانسیل

در این قسمت به تحلیل نقش پارامترهای کشش سطحی  $\gamma$ -MS،  $\gamma$ -MN1976،  $\gamma$ -MN1995 و  $\gamma$ -MSNew بر روی پتانسیل همجوشی می‌پردازیم. این مجموعه از ضرائب در مرجع [۱۹] به‌طور کامل تفسیر شده‌اند. از بین چهار پارامتر کشش سطحی ذکر شده، سه مورد آنها با استفاده از معادله ۸ محاسبه می‌شوند که در جدول ۱ مقادیر  $\gamma_0$  و  $K_s$  آنها ذکر شده است.

جدول ۱:  $\gamma_0$  و  $K_s$  مربوط به پارامترهای  $\gamma$ -MN1976،  $\gamma$ -MN1995 و  $\gamma$ -MS [۱۹].

نوع کشش سطحی	$\gamma_0$ ( $\frac{\text{MeV}}{\text{fm}^2}$ )	$K_s$
$\gamma$ -MS	۰٫۹۵۱۷	۱٫۷۸۲۶
$\gamma$ -MN1976	۱٫۴۶۰۷۳۴	۴٫۰
$\gamma$ -MN1995	۱٫۲۵۲۸۴	۲٫۳۴۵

نوع چهارم  $\gamma$  یعنی  $\gamma$ -MSNew برابر است با [۱۹]:

$$\gamma = \frac{1}{4\pi r_0^2} \left[ 18.63 - Q \frac{(t_1 + t_2)}{2r_0^2} \right] \quad 10$$

پارامتر  $t_i$  در عبارت فوق برابر است با:

$$t_i = \frac{3}{2} r_0 \left( \frac{J_{i-1} c_1 Z_i A_i^{-1/3}}{Q + \frac{9}{4} J A_i^{-1/3}} \right) \quad (i=1,2) \quad 11$$

$$I_i = \frac{N_i - Z_i}{A_i} \quad (i=1,2) \quad 12$$

ضرائب  $J$ ،  $c_1$  و  $Q$  به ترتیب برابر ۳۲٫۶۵، ۰٫۷۵۷۸۹۵ و ۳۵٫۴ می‌باشند. با توجه به روابط فوق و پارامترهای کشش سطحی ذکر شده پتانسیل هسته‌ای کل برای واکنش همجوشی  ${}^9\text{Be} + {}^{186}\text{W}$  با توجه به پرتابه کامل

پتانسیل مجاورت نسخه AW95 استفاده شده است، زیرا اثرات کشش سطحی در آن لحاظ شده است. این نسخه، از پتانسیل مجاورت که به شکل کلی وودز-ساکسون<sup>۱</sup> می‌باشد عبارت است از [۲۲]:

$$V_N^{AW95}(r) = - \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R_0}{a}\right)} \quad \text{MeV} \quad 4$$

در رابطه فوق،  $V_0$  عمق پتانسیل و برابر است با

$$V_0 = 16\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gamma a \quad \text{MeV} \quad 5$$

پارامترهای  $R_1$ ،  $R_2$ ،  $a$  و  $\gamma$  به ترتیب شعاع‌های پرتابه و هدف، پخشیدگی سطحی و کشش سطحی هستند و برابر هستند با [۲۲]:

$$R_i = 1.20 A_i^{1/3} - 0.09 \quad \text{fm} \quad i=1,2 \quad 6$$

$$a = \left[ \frac{1}{1.17(1 + 0.53(A_1^{-1/3} + A_2^{-1/3}))} \right] \quad \text{fm} \quad 7$$

$$\gamma = \gamma_0 [1 - K_s A_s^2] \quad \text{MeV/fm}^2 \quad 8$$

پارامترهای  $\gamma_0$  و  $K_s$  در عبارت ۸ به ترتیب ثابت کشش سطحی با مقدار  $0.95 \text{ (MeV/fm}^2\text{)}$  و ثابت عدم تقارن سطحی با مقدار  $1/8$  هستند [۲۲]. پارامتر  $A_s$  میزان عدم تقارن سطحی را نشان می‌دهد [۲۲]:

$$A_s = \frac{N_1 + N_2 - Z_1 - Z_2}{A_1 + A_2} \quad 9$$

با توجه به روابط فوق، پتانسیل اندرکنشی کل با استفاده از انواع مختلف کشش سطحی قابل محاسبه است. در ادامه این بحث را دنبال می‌کنیم.

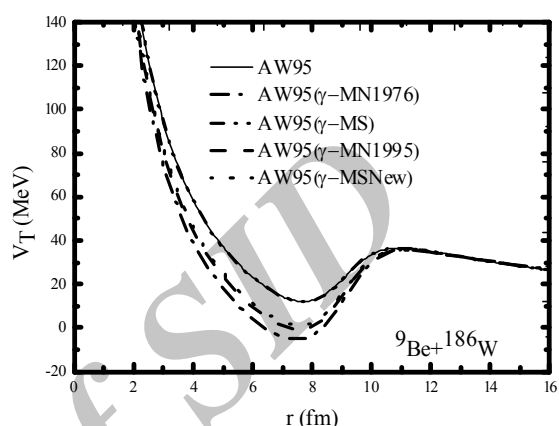
<sup>1</sup>Woods-Saxon

گرفت که افزایش قدرت ضریب کشش سطحی از نسخه  $\gamma$ -MS تا نسخه  $\gamma$ -MN1976 ارتفاع سد همجوشی را کاهش و به طور همزمان توافق میان داده‌های نظری و تجربی  $V_B$  را در مورد واکنش مذکور افزایش خواهد داد. حال با استفاده از این پتانسیل‌های به دست آمده، سطح مقطع‌های همجوشی کامل و ناکامل را محاسبه کرده و میزان تأثیر پارامترهای کشش سطحی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

### مدل دینامیکی سه جسمی مسیریابی کلاسیکی

برای محاسبه سطح مقطع همجوشی مدل‌های مختلفی مانند مدل وانگ [۲۳]، مدل کانال‌های جفت شده [۲۴] و مدل مسیریابی کلاسیکی [۲۰] وجود دارد. در این بین، مدل وانگ و مدل کانال جفت شده چون نمی‌توانند سطح مقطع‌های همجوشی کامل و ناکامل را جداگانه محاسبه کنند، در توصیف داده‌های آزمایشگاهی واکنش‌های با هسته‌های ضعیف پیوند موفقیت چندانی را کسب نکرده‌اند اما مدل مسیریابی کلاسیکی این ویژگی را دارد که علاوه بر محاسبه سطح مقطع کل می‌تواند سطح مقطع همجوشی کامل و ناکامل را جداگانه محاسبه کند. در این مدل، با در نظر گرفتن نیروهای متقابل هسته‌ای و کولنی و معادلات کلاسیک حرکت، مداری برای حرکت پرتابه برحسب فاصله بین پرتابه و هدف تعیین می‌کنند. شکست پرتابه در طول این مدار را با استفاده از تابع چگالی، احتمال شکست موضعی در واحد طول،  $P_{BU}^L(R)$ ، تفسیر می‌کنند. انتگرال تابع چگالی احتمال شکست در طول یک مدار کلاسیکی، تابعی نمایشی از نزدیکترین فاصله بین دو هسته یعنی  $R_{min}(E_0, L_0)$  خواهد شد [۲۰، ۲۵]:

مورد محاسبه قرار گرفته است. شکل ۱ اثر انواع مختلف  $\gamma$  را بر روی پتانسیل کل و جدول ۲ اثر آن را بر روی مکان و ارتفاع سد پتانسیل برای همجوشی نشان می‌دهد.



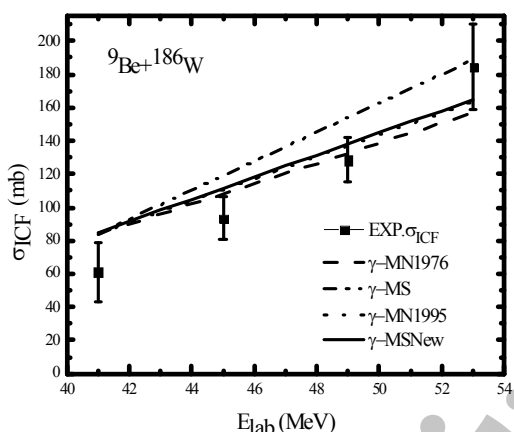
شکل ۱. پتانسیل اندرکنش کل در واکنش  ${}^9\text{Be}+{}^{186}\text{W}$  با استفاده از پتانسیل AW95 در دو حالت استاندارد و با پارامترهای کشش سطحی مختلف.

جدول ۲. مکان  $R_B$  و ارتفاع  $V_B$  سد پتانسیل کل در واکنش  ${}^9\text{Be}+{}^{186}\text{W}$

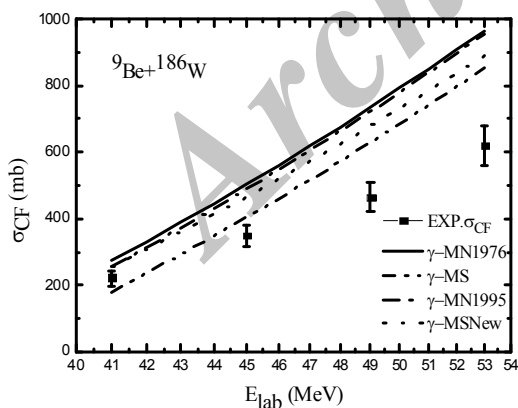
انواع پتانسیل	$R_B$ (fm)	$V_B$ (MeV)	EXP. $V_B$ (MeV)
AW95	۱۰٫۹	۳۶٫۶	۳۵٫۴
AW95( $\gamma$ -MS)	۱۰٫۹	۳۶٫۶	۳۵٫۴
AW95( $\gamma$ -MN1976)	۱۱٫۲	۳۵٫۸	۳۵٫۴
AW95( $\gamma$ -MN1995)	۱۱٫۱	۳۶٫۰	۳۵٫۴
AW95( $\gamma$ -MSNew)	۱۱٫۱	۳۶٫۱	۳۵٫۴

همان‌طور که از شکل ۱ و جدول ۲ مشخص است، این پارامتر بر روی عمق پتانسیل  $V_0$ ، مکان سد  $R_B$  و ارتفاع سد پتانسیل  $V_B$  اثر گذاشته است، به طوری که کم عمق‌ترین پتانسیل را کشش سطحی  $\gamma$ -MS و عمیق‌ترین پتانسیل را کشش سطحی  $\gamma$ -MN1976 تولید کرده است. همچنین کشش سطحی  $\gamma$ -MN1976 از لحاظ ارتفاع سد با داده تجربی توافق خوبی دارد. همچنین با توجه به داده‌های این جدول، می‌توان نتیجه

کشش سطحی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سطح مقطع‌های محاسبه شده مقداری با داده تجربی اختلاف دارند. با بررسی شکل ۵ که میزان خطا را در محاسبات سطح مقطع همجوشی کامل نشان می‌دهد، نتیجه می‌شود که محاسبات مربوط به  $\gamma$ -MS نسبت به سایر کشش سطحی‌ها داده تجربی را بهتر توصیف می‌کند.



شکل ۲. مقایسه سطح مقطع سطح مقطع همجوشی ناکامل با داده تجربی با استفاده از انواع پارامتر کشش سطحی.



شکل ۳. مقایسه میزان خطا در محاسبه سطح مقطع همجوشی ناکامل.

در رابطه فوق،  $\nu$  و  $\mu$  دو پارامتر تجربی هستند که در واکنش  ${}^9\text{Be}+{}^{186}\text{W}$  مقادیر  $\mu = -0.909 \text{ fm}^{-1}$  و  $\nu = 8.801$  گزارش شده است [۲۵]. با استفاده از این تابع، چگالی سطح مقطع عبارت است از [۲۵]:

$$\sigma_i(E_0) = \pi \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \sum_{l_0} (2l_0 + 1) P_i(E_0, L_0) \quad 14$$

در این رابطه،  $\left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 = \frac{\hbar^2}{2m_p E_0}$  و  $m_p$  جرم پرتابه است. توابع احتمال  $P_i(E_0, L_0)$  به صورت  $i=0$  برای NCBU،  $i=1$  برای ICF و  $i=2$  برای CF تعریف می‌شود و برابر است با [۲۵]:

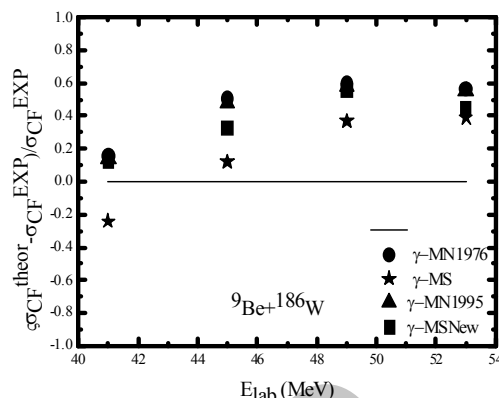
$$P_0(E_0, L_0) = P_{BU}(R_{\min}) \bar{P}_0 \quad 15$$

$$P_1(E_0, L_0) = P_{BU}(R_{\min}) \bar{P}_1 \quad 16$$

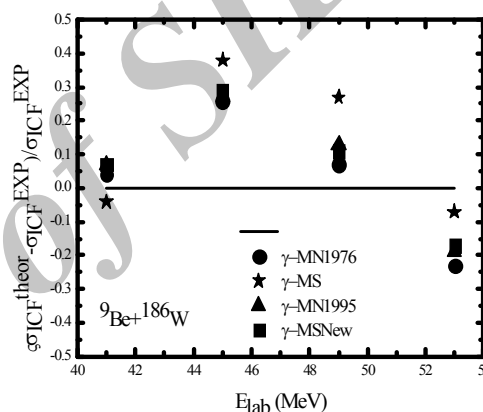
$$P_2(E_0, L_0) = [1 - P_{BU}(R_{\min})] \times H(L_{cr} - L_0) + P_{BU}(R_{\min}) \bar{P}_2 \quad 17$$

در روابط فوق  $\bar{P}_i = \frac{N_i}{N}$  و  $\bar{P}_0 + \bar{P}_1 + \bar{P}_2 = 1$  می‌باشد. در رابطه فوق  $H(x)$  تابع هوی ساید و  $N_i$  تعداد حالت‌ها است. محاسبات فوق در قالب کد محاسباتی PLATYPUS صورت گرفته است [۲۶]. نتایج در شکل‌های زیر آمده است. به این ترتیب که شکل ۲ نشان دهنده محاسبات سطح مقطع همجوشی ناکامل با استفاده از انواع مختلف کشش سطحی است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد محاسبات حاضر می‌توانند داده‌های تجربی را به خوبی بازتولید کنند. به خصوص، با بررسی شکل ۳ که بیانگر میزان خطای محاسبات سطح مقطع همجوشی ناکامل است، نتیجه می‌شود که سطح مقطع‌های محاسبه شده با استفاده از  $\gamma$ -MN1976 داده تجربی را بهتر از سایر ضرائب باز تولید می‌کند. شکل ۴ محاسبات سطح مقطع همجوشی کامل را با استفاده از انواع مختلف

مجاورت نسخه AW95 برای محاسبه پتانسیل هسته‌ای استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که اثر این پارامترها بر روی پتانسیل اندرکنش  ${}^9\text{Be}+{}^{186}\text{W}$  از چند جهت قابل توجه می‌باشند. ابتدا با توجه به داده‌های جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قدرت ضریب ککش سطحی از نسخه  $\gamma\text{-MS}$  تا نسخه  $\gamma\text{-MN1976}$  ارتفاع سد همجوشی را کاهش و به‌طور هم‌زمان توافق میان داده‌های نظری و تجربی  $V_B$  را در مورد واکنش مذکور افزایش خواهد داد. این بدان معنی است که افزایش قدرت ککش سطحی هسته‌ها موجب کاهش ارتفاع سد همجوشی و افزایش احتمال تونل زنی از این سد کوتاه‌تر و نتیجتاً افزایش احتمال همجوشی یا همان افزایش سطح مقطع‌ها را به دنبال دارد. نکته دوم اینکه از لحاظ عمق پتانسیل، کم‌ترین عمق مربوط به ککش سطحی  $\gamma\text{-MS}$  (که با مدل AW95 منطبق است) و بیشترین عمق مربوط به  $\gamma\text{-MN1976}$  می‌باشد. همچنین پتانسیل مربوط به ککش سطحی  $\gamma\text{-MN1976}$  از نظر ارتفاع سد توافق خوبی با داده تجربی دارد (شکل ۱ و جدول ۲ را ببینید). با استفاده از این پتانسیل‌ها و مدل مسیریابی کلاسیکی، که برای محاسبه سطح مقطع از آن استفاده شده است، سطح مقطع‌های همجوشی کامل و ناکامل را مورد محاسبه قرار داده‌ایم. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برای اندرکنش  ${}^9\text{Be}+{}^{186}\text{W}$ ، سطح مقطع همجوشی ناکامل ناشی از انواع ککش سطحی توافق خوبی با داده‌های تجربی دارد به‌خصوص که با بررسی شکل ۳ محاسبات مربوط به  $\gamma\text{-MN1976}$  با داده‌های تجربی توافق بهتری دارد. اما با توجه به شکل ۴، سطح



شکل ۴. مقایسه سطح مقطع سطح مقطع همجوشی کامل با داده تجربی با استفاده از انواع پارامتر ککش سطحی.



شکل ۵. مقایسه میزان خطا در محاسبه سطح مقطع سطح مقطع همجوشی کامل.

## نتیجه‌گیری

تلاش‌های بسیاری در سال‌های اخیر صورت گرفته است تا مدل مناسبی برای توصیف پتانسیل هسته‌ای در واکنش با هسته‌های ضعیف پیوند معرفی شود. در این بین، مدل‌های مجاورت موفقیت بیشتری داشته‌اند و نسخه‌های مختلفی از آنها معرفی شده است. در کار حاضر، تلاش شده است تا میزان تأثیر پذیری سطح مقطع‌ها از پارامتر ککش سطحی هسته‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در بررسی همجوشی هسته‌های ضعیف پیوند تحت تأثیر انواع مختلف ککش سطحی ( $\gamma\text{-MS}$ ،  $\gamma\text{-MN1976}$ ،  $\gamma\text{-MN1995}$  و  $\gamma\text{-MSNew}$ ) از مدل

[4] M. Dasgupta, D.J. Hinde, K. Hagino *et al.*, Fusion and breakup in the reactions of  ${}^6\text{Li}$  and  ${}^7\text{Li}$  nuclei with  ${}^{209}\text{Bi}$ , *Physical Review C* **66** (2002) 041602(R),1-5.

[5] E. Crema, L.C. Chamon, P.R.S. Gomes, Reliable potential for studying fusion of weakly bound nuclei, *Physical Review C* **72** (2005) 034610,1-9.

[6] J.M.B. Shorto, P.R.S. Gomes, J. Lubian, L.F. Canto, S. Mukherjee, L.C. Chamon, Reaction functions for weakly bound systems, *Physics Letters B* **678** (2009) 77-81

[7] W.Y. So, T. Udagawa, K.S. Kim, S.W. Hong, and B.T. Kim, Characteristics of the polarization part of the optical potential for a weakly bound projectile,  ${}^9\text{Be}$ , *Physical Review C* **81** (2010) 047604,1-4.

[8] D.J. Hinde, M. Dasgupta, Systematic analysis of above-barrier fusion of  ${}^{9,10,11}\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ , *Physical Review C* **81** (2010) 064611,1-12.

[9] P.R.S. Gomes, R. Linares, J. Lubian, C.C. Lopes, E.N. Cardozo, B.H.F. Pereira, I. Padron, Search for systematic behavior of incomplete-fusion probability and complete-fusion suppression induced by  ${}^9\text{Be}$  on different targets, *Physical Review C* **84** (2011) 014615,1-5.

[10] X.P. Yang, G.L. Zhang, H.Q. Zhang, Systematic study of reaction functions of weakly bound nuclei, *Physical Review C* **87** (2013) 014603,1-10.

[11] D.R. Otomar, P.R.S. Gomes, J. Lubian, L.F. Canto, M.S. Hussein, Nuclear and Coulomb breakup of the weakly bound  ${}^6\text{Li}$  nucleus with targets in the range from  $A=59$  to 208, *Physical Review C* **87** (2013) 014615,1-4.

مقطع همجوشی کامل ناشی از انواع پارامتر کشش سطحی در مقایسه با داده‌های تجربی مقداری اختلاف دارد. با مشاهده شکل ۵ که میزان خطای سطح مقطع همجوشی کامل را نشان می‌دهد، محاسبات کشش سطحی  $\gamma$ -MS داده‌های تجربی مربوط به سطح مقطع همجوشی کامل را بهتر توصیف می‌کنند. همچنین نتایج حاصل از شکل ۳ و ۵ نشان می‌دهند که این پارامتر در طی واکنش و در انرژی‌های مختلف مقادیر متفاوتی را می‌تواند اختیار کند که این خود نشان دهنده تغییرات رفتار خواص هسته در طی واکنش و در انرژی‌های پرتابی متفاوت است. بنابراین با توجه به توضیحات فوق در حالت کلی نتیجه می‌گیریم که کشش سطحی اثر قابل توجهی بر روی پتانسیل و سطح مقطع همجوشی پرتابه ضعیف پیوند دارد.

#### مرجع‌ها

[1] L.F. Canto, J. Lubian, P.R.S. Gomes, M.S. Hussein, Continuum-continuum coupling and polarization potentials for weakly bound system, *Physical Review C* **80** (2009) 047601,1-14.

[2] A.G. Camacho, E.F. Aguilera, E.M. Quiroz, P.R.S. Gomes, J. Lubian, L.F. Canto, The threshold anomaly of weakly bound projectiles from recent elastic scattering measurements around the coulomb barrier, *Nuclear Physics A* **833** (2010) 156-171.

[3] V.V. Parkar, R. Palit, S.K. Sharma, B.S. Naidu, S. Santra, P.K. Joshi, A. Raghav, Fusion cross sections for the  ${}^9\text{Be}+{}^{124}\text{Sn}$  reaction at energies near the coulomb barrier, *Physical Review C* **82** (2010) 054601,1-10.

- [21] Y.D. Fang et.al, Fusion and one-neutron stripping reactions in the  ${}^9\text{Be}+{}^{186}\text{W}$  system above the Coulomb barrier, *Physical Review C* **87**, (2013) 024604,1-8.
- [22] I. Dutt, R.K. Puri, Comparison of different proximity potentials for asymmetric colliding nuclei, *Physical Review C* **81**, (2010) 064609,1-7.
- [23] C.Y. Wong, Interaction Barrier in Charged-Particle Nuclear Reactions, *Physical Review Letters* **31**, (1973) 766-771.
- [24] K. Hagino, N. Rowley, A.T. Kruppa, A program for coupled-channel calculations with all order couplings for heavy-ion fusion reactions, *Computer physics Communications* **123** (1999) 143-152.
- [25] R. Rafiei et. Al., Mechanisms and systematics of breakup in reactions of  ${}^9\text{Be}$  at near-barrier energies, *Physical Review C* **81** (2010) 024601,1-5.
- [26] A. Diaz-Torres, PLATYPUS: A code for reaction dynamics of weakly-bound nuclei at near-barrier energies within a classical dynamical model, *Computer Physics Communications* **182**, (2011) 1100-1104.
- [12] L.F. Canto et.al, Fusion and breakup of weakly bound nuclei, *Physics Report* **424** (2006) 1.
- [13] C.S. Palshetkar et. al., Fusion of the weakly bound projectile  ${}^9\text{Be}$  with  ${}^{89}\text{Y}$ , *Physical Review C* **82** (2010) 044608,1-9.
- [14] C.K. Phookan, K. Kalita, Systematic study of Coulomb barrier of reactions induced by loosely bound projectiles using proximity potential, *Nuclear Physics A* **899** (2013) 29-43.
- [15] H. Esbensen, Complete fusion of  ${}^9\text{Be}$  with spherical targets, *Physical Review C* **81** (2010) 034606,1-7.
- [16] L.F. Canto, P.R.S. Gomes, J. Lubian, L.C. Chamon, E. Crema, Dynamic effects of breakup on fusion reactions of weakly bound nuclei, *Nuclear Physics A* **821** (2009) 151-154.
- [17] A. Diaz-Torres, I.J. Thompson, C. Beck, How does breakup influence the total fusion of  ${}^6,7\text{Li}$  at the Coulomb barrier? , *Physical Review C* **68** (2003) 044607,1-11.
- [18] R. Gharaei, O.N. Ghodsi, Role of Surface Energy Coefficients and Temperature in the Fusion Reactions induced by Weakly Bound Projectiles, *Communications in Theoretical Physics* **64** (2015) 185-197.
- [19] I. Dutt, R.K. Puri, Role of surface energy coefficients and nuclear surface diffuseness in the fusion of heavy-ions, *Physical Review C* **81** (2010) 047601,1-6.
- [20] A. Diaz-Torres et. al., Relating Breakup and Incomplete Fusion of Weakly Bound Nuclei through a Classical Trajectory Model with Stochastic Breakup, *Physical Review Letters* **98**, (2007) 152701,1-9.



## Role of surface energy coefficients in fusion with weakly bound projectile

Omid Naser Ghodsi<sup>1</sup>, Seyyed Amin Seyyedi<sup>2,\*</sup>, Tahereh Ghasemi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Mazandaran University, Babolsar, Iran

<sup>2</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 17.05.2016      Final revised: 28.05.2017      Accepted: 29.05.2017

### Abstract

In the present study we are attempting to investigate the influence of surface energy coefficients ("γ-MS,γ-MN1976,γ-MN1995,γ-MSNew" ) on the fusion systems including weakly bound projectiles. This interaction potential is calculated using proximity potential AW95 as well as three body dynamic classical trajectory to calculate fusion cross section. Our obtained results reveal that among the four surface energy coefficients, "γ-MS" leads to a shallow potential compared to other sets of "γ", whereas "γ-MN1976" leads to the deepest potential as well as the barrier height of potential of "γ-MN1976" is better agreement with experimental data. Also complete fusion cross section of "γ-MS" surface energy is better agreement with experimental data while in the incomplete fusion cross section, the "γ-MN1976" can reproduce the experimental data well.

**Keywords:** Weakly bound nuclei; Surface energy coefficients; Proximity potentials, Complete and incomplete Fusion cross section

---

\* Corresponding Author: amin.seyyedi@gmail.com