

## اهمیت شکست پرتابه ${}^9\text{Be}$ در واکنش های همجوشی با هدف های ${}^{124}\text{Sn}$ , ${}^{144}\text{Sm}$ , ${}^{89}\text{Y}$

امید ناصر قدسی<sup>(۱)</sup> - سید امین سیدی<sup>(۲)</sup>

<sup>(۱)</sup> دانشگاه مازندران، دانشکده فیزیک، بابلسر

<sup>(۲)</sup> دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

### چکیده:

در این تحقیق واکنش های بین هسته ضعیف پیوند پایدار  ${}^9\text{Be}$  با هسته های  ${}^{124}\text{Sn}$ ,  ${}^{89}\text{Y}$ ,  ${}^{144}\text{Sm}$  مورد بررسی قرار گرفته است. پتانسیل هسته ای این اندرکنش ها با استفاده از مدل *Proximity* مورد محاسبه قرار گرفته است. برای محاسبه سطح مقطع واکنش ها و احتمال رویداد همجوشی ناکامل به عنوان معیاری از شکست پرتابه قبل از رسیدن به شعاع همجوشی، از مدل دینامیکی سه بعدی مسیریابی کلاسیکی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از این روش نشان می دهد که سطح مقطع ها و احتمال رویداد همجوشی ناکامل بدست آمده، داده های متناظر آزمایشگاهی را بخوبی توصیف می کنند.

**کلمات کلیدی:** واکنش های همجوشی، هسته های ضعیف پیوند، سطح مقطع همجوشی

### مقدمه :

در سال های اخیر، بررسی ها از منظر نظری و آزمایشگاهی واکنشهای یون سنگین، با حضور هسته های ضعیف پیوند مورد توجه گسترده ای قرار گرفته است [۴-۱]. اینگونه هسته های ضعیف پیوند، مثل  ${}^6\text{Li}$  و  ${}^9\text{Be}$  در تشکیل هسته های فوق سنگین و درک ساختارهای هسته ای اهمیت قابل توجهی دارند. بررسی مکانیسم انجام این واکنش ها از این منظر مورد توجه است که بدلیل انرژی پیوندی کم اینگونه هسته ها در مقایسه با هسته های قوی پیوند، وقوع واکنش از چند کانال دنبال می شود. در ساده ترین حالت ممکن است کل پرتابه بدون شکستن با هسته هدف وارد واکنش همجوشی شود که به فرایند همجوشی کامل (CF) معروف است. در حالتی نیز ممکن است هسته ضعیف پیوند شکسته شده و به دو یا چند قطعه تبدیل شود و تنها بخشی از آن در شعاع سد کولنی هسته هدف قرار گرفته و با آن واکنش همجوشی انجام دهد که به این فرایند همجوشی ناکامل (ICF) می گویند. اخیراً در تحقیقات مستقل [۵،۶]، گزارش شده است که محاسبات نظری با دیدگاه استاتیکی بدون در نظر گرفتن اثرات شکست، سطح مقطع های همجوشی کامل را در حدود ۳۰٪-۲۵٪ بیشتر از سطح مقطع های تجربی پیش بینی می کنند که مقدار خالص این اختلاف به پارامتر مقاومت (CF Suppression) مشهور است. به نظر می رسد پارامتر مقاومت در سطح مقطع همجوشی کامل ناشی از حضور کانالهای موازی واکنش در حین انجام فرایند مستقیم CF باشد که با کانال اصلی واکنش مورد انتظار رقابت می



کند. هدف ما در این تحقیق بررسی واکنش های  ${}^9\text{Be}$  با هسته های هدف  ${}^{124}\text{Sn}$  و  ${}^{89}\text{Y}$  و  ${}^{144}\text{Sm}$  است که اخیراً داده های تجربی آنها ارائه شده است [۸-۱۰]. این واکنش ها را از دیدگاه دینامیکی با در نظر گرفتن اثرات شکست پرتابه و مدل دینامیکی سه بعدی مسیریابی کلاسیکی [۷] برای محاسبه سطح مقطع های کامل و ناکامل همجوشی مورد بررسی قرار می دهیم. پیدا کردن رفتاری منظم در احتمال وقوع فرایند ICF در درک مکانیسم انجام واکنش های شامل هسته های رادیواکتیو ضعیف پیوند موثر می باشد. بنابراین احتمال وقوع فرایند ICF را با استفاده از نتایج روش کلاسیکی دینامیکی سه بعدی مورد مطالعه قرار خواهیم داد.

### محاسبه پتانسیل هسته ای با روش Proximity

پتانسیل کل بین دو هسته برهمکنش گر شامل مجموع پتانسیل های کولنی، هسته ای و مداری است که در محاسبه سطح مقطع همجوشی از اهمیت زیادی برخوردار است. محاسبه پتانسیل کولنی و قسمت مداری با دقت زیادی صورت می گیرد اما برای محاسبه بخش هسته ای مدل های متفاوتی ارائه شده است. از جمله این روش ها می توان به روش Proximity اشاره داشت. در سالهای اخیر مطالعات زیادی روی این مدل انجام گرفته است و نسخه های متفاوتی از آن ارائه شده است [۱۱]. در این تحقیق از نسخه AW 95 بدلیل تعمیم این مدل به واکنش با هسته های سبک برای پتانسیل هسته ای استفاده شده است [۱۲]. پتانسیل هسته ای در این مدل به شکل زیر تعریف می شود:

$$V_N^{AW\ 95}(r) = - \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R_0}{0.63}\right)} \text{ MeV} \quad (1)$$

$$V_0 = 16\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gamma a \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\gamma$  و  $a$  پارامتر کشش سطحی و پخشیدگی سطحی می باشند و با روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\gamma = \gamma_0 \left[ 1 - 1.8 \left( \frac{N_P - Z_P}{A_P} \right) \left( \frac{N_T - Z_T}{A_T} \right) \right] \quad (3)$$

$$a = \left[ \frac{1}{1.17(1 + 0.53(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}))} \right] \quad (4)$$

که  $\gamma_0 = 0.95 \text{ MeV/fm}$  می باشد. همچنین  $R_i$  با رابطه  $R = 1.20A^{1/3} - 0.09$  ( $i = 1, 2$ ) محاسبه می شود. در این تحقیق ابتدا فرض شده است که پرتابه  ${}^9\text{Be}$  در اثر شکست کولنی قبل از رسیدن به شعاع سد کولنی به دو ذره آلفا و یک نوترون شکسته می شود. سپس با استفاده از روابط فوق برای سه سیستم  ${}^{124}\text{Sn}$  و  ${}^{89}\text{Y}$  و  ${}^9\text{Be} + {}^{144}\text{Sm}$  پتانسیل های هسته ای برای ترکیب های پرتابه - هدف و ذره آلفا + هدف + ذره آلفا) به طور مجزا مورد محاسبه قرار گرفته است. پارامترهای عمق  $V_0$  و پخشیدگی  $a$  و شعاع  $R$  در جدول شماره ۱ لیست شده اند.

جدول شماره ۱: پارامترهای عمق  $V_0$  و پخشیدگی  $a$  و شعاع  $R$  پتانسیل برای ترکیب های پرتابه+ هدف و ذره  
آلفا + هدف و ذره آلفا + (هدف + ذره آلفا) برای سه سیستم  $^{124}\text{Sn}$  و  $^{89}\text{Y}$  و  $^{144}\text{Sm}$  و  $^9\text{Be}$ .

واکنش	$V_0 (MeV)$	$R (fm)$	$a_0 (fm)$
$^4\text{He}+^4\text{He}$	۱۶,۷	۱,۲	۰,۶۲
$^9\text{Be}+^{124}\text{Sn}$	۱۲۰,۹	۱,۳۹	۰,۸۲
$^4\text{He}+^{124}\text{Sn}$	۶۶,۹	۱,۳۹	۰,۷۵
$^4\text{He}+^{128}\text{Te}$	۴۵,۹۷	۱,۴۷	۰,۶۹
$^9\text{Be}+^{89}\text{Y}$	۱۲۰,۹	۱,۵۰	۰,۷۲
$^4\text{He}+^{89}\text{Y}$	۵۱,۹	۱,۵۰	۰,۶۵
$^4\text{He}+^{93}\text{Nb}$	۴۵,۶۷	۱,۵۳	۰,۶۲
$^9\text{Be}+^{144}\text{Sm}$	۱۳۰,۹	۱,۴۵	۰,۷۵
$^4\text{He}+^{144}\text{Sm}$	۶۶,۹	۱,۴۰	۰,۷۱
$^4\text{He}+^{148}\text{Gd}$	۴۵,۹۷	۱,۴۹	۰,۶۳

### مدل دینامیکی سه بعدی مسیریابی کلاسیکی

برای محاسبه سطح مقطع واکنش های همجوشی از روش های مختلفی مثل مدل وانگ [۱۳] و مدل کانال های جفت شده [۱۴] استفاده می شود. در این میان دلیل شکست پرتابه و انحراف بخشی از شار ورودی از مسیر اصلی واکنش های همجوشی با هسته های رادیو اکتیو پایدار مثل  $^9\text{Be}$  این روش ها در توصیف داده های آزمایشگاهی توفیق چندانی ندارند چون به محاسبه سطح مقطع کل می پردازند. از سوی دیگر، مدل دینامیکی سه بعدی مسیریابی کلاسیکی روشی است که برای محاسبه سطح مقطع های اینگونه واکنش ها با توجه به اثرات شکست پرتابه های ضعیف پیوند قابل استفاده است و این توان را در اختیار می گذارد که بتوان سطح مقطع  $\text{ICF}$  و  $\text{CF}$  را با تفکیک از یکدیگر محاسبه کرد. بر اساس این مدل، با در نظر گرفتن نیروهای متقابل هسته ای و کولنی، معادلات کلاسیک حرکت، مداری برای حرکت پرتابه ها بر حسب فاصله بین پرتابه-هدف تعیین می کنند. از سوئی، تجزیه احتمالی پرتابه در طول این مسیر، با استفاده از یک تابع چگالی احتمال شکست موضعی تفسیر می شود. در مورد یک ترکیب از هدف و پرتابه اندازه گیری های تجربی نشان می دهند که انتگرال این چگالی احتمال شکست در طول یک مدار کلاسیکی محاسبه شده، تابعی است نمایی از نزدیکترین فاصله بین دو هسته یعنی  $R_{\min}(E_0, L_0)$  و رابطه زیر نتیجه خواهد شد [۱۵]:

$$P_{BU}(R_{\min}) = \exp(\nu + \mu R_{\min}) \quad (5)$$

$\mu$  و  $\nu$  دو ثابت هستند. با استفاده از این تابع محاسبه محل شکست در طول مسیر کلاسیکی مذکور قابل محاسبه خواهد بود. در این محل پرتابه به طور آنی به دو ذره  $\alpha$  و یک نوترون شکسته می شود. سطح مقطع ها در این روش از رابطه زیر محاسبه می شوند:

$$\sigma_i(E_0) = \pi\lambda^2 \sum_{L_0} (2L_0 + 1) P_i(E_0, L_0) \quad (6)$$

در این رابطه  $\lambda^2 = \frac{\hbar^2}{2m_p E_0}$  و  $m_p$  جرم پرتابه است. توابع احتمال  $P_i(E_0, L_0)$  نیز برای حالت های مختلف تعریف می شود. وقتی شکست رخ ندهد ( $i = 0$ ) و برای همجوشی کامل ( $i = 1$ ) و همجوشی ناکامل ( $i = 2$ ) است که از روابط زیر قابل محاسبه می باشند:

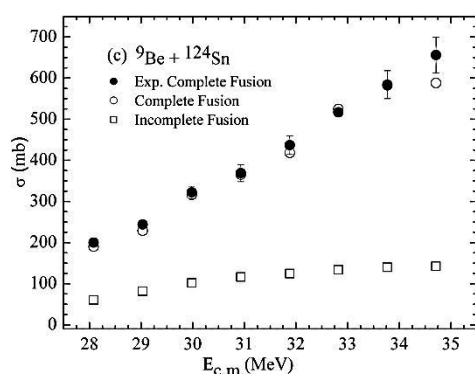
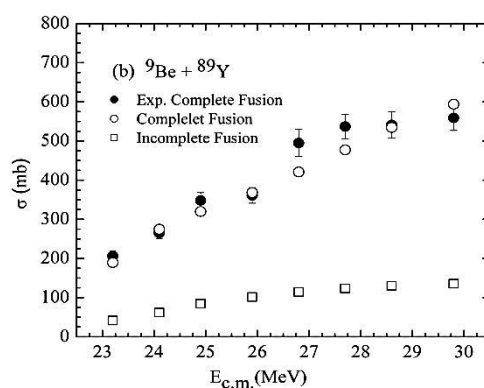
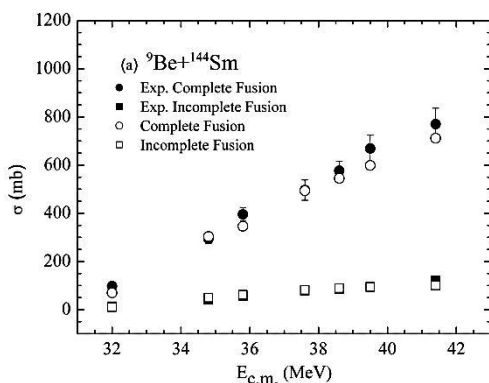
$$P_0(E_0, L_0) = P_{BU}(R_{min}) \tilde{P}_0 \quad (7)$$

$$P_1(E_0, L_0) = P_{BU}(R_{min}) \tilde{P}_1 \quad (8)$$

$$P_2(E_0, L_0) = [1 - P_{BU}(R_{min})] H(L_{cr.} - L_0) + P_{BU}(R_{min}) \tilde{P}_2 \quad (9)$$

در روابط فوق  $\tilde{P}_0 = N_i/N$  می باشد و  $N_i \tilde{P}_0 + \tilde{P}_1 + \tilde{P}_2 = 1$  نیز تعداد حالت ها است.

با تعیین بستگی شعاعی احتمال شکست پرتابه پیش بینی های یافته های بالای سد کولنی برای ICF و CF با استفاده از الگوریتم بیان شده فوق امکان پذیر می باشد. تابع مهم در محاسبه سطح مقطع تابع احتمال شکست پرتابه، رابطه ۱، می باشد که از داده های تجربی متناظر مرجع [۱۵] استفاده شده است. در محاسبات حاضر نمونه ای از ۱۲۰۰ پرتابه فرودی را به ازاء هر انرژی مورد استفاده قرار داده ایم تا نتایج حاصله بخوبی همگرا شوند. محاسبات فوق توسط کد PLATYPUS صورت گرفته است [۱۶]. سطح مقطع های کامل و ناکامل محاسبه شده و با نتایج تجربی موجود در شکل ۱ مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۱: سطح مقطع های CF و ICF محاسبه شده در انرژی های مختلف برای واکنش  ${}^9\text{Be}$  با هسته های (a)  ${}^{144}\text{Sm}$  (b)  ${}^{89}\text{Y}$  (c)  ${}^{124}\text{Sn}$ .

## احتمال همجوشی ناکامل (PICF)

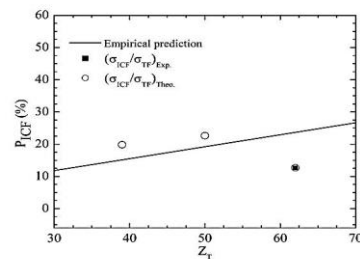
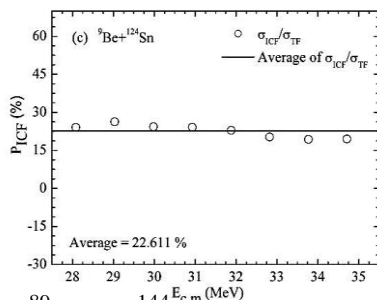
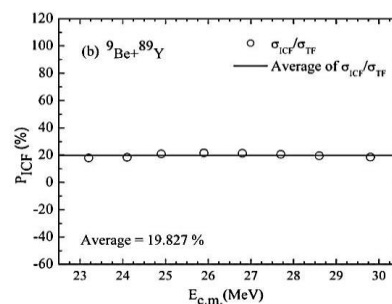
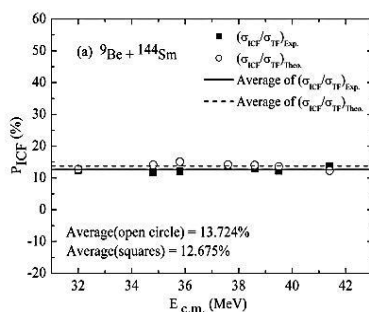
احتمال رویداد همجوشی ناکامل از رابطه:

$$P_{ICF}(\%) = \left| \frac{\sigma_{ICF}}{\sigma_{CF} + \sigma_{ICF}} \right| \times 100$$

برای سه واکنش مذکور با استفاده از سطح مقطع های بدست آمده در بخش قبل محاسبه شد و در شکل 2- a,b,c به صورت دایره های توخالی نمایش داده شده است. در این شکل ها مقدار میانگین  $P_{ICF}(\%)$  نیز نشان داده شده است. از سویی دیگر پارامتر احتمال رویداد همجوشی ناکامل ( $P_{ICF}$ ) برای هسته های مختلف به صورت رابطه نیمه تجربی زیر پیشنهاد شده است [۱۷]:

$$P_{ICF} = 0.32 \frac{V'_N}{V'_N} e^{(-0.924(R_S - R_S(208Pb)))} \quad (10)$$

که در این رابطه  $V'_N$  و  $R_S$  بترتیب مشتق پتانسیل هسته ای و ارتفاع سد همجوشی است که وابسته به مدل مورد استفاده در محاسبه پتانسیل هسته ای است. این دو کمیت برای  $^{208}\text{Pb}$  به صورت آزمایشگاهی در مرجع [۱۷] گزارش شده است و در رابطه فوق استفاده شده است. در محاسبات حاضر برای رابطه فوق همه کمیات در شعاع سد همجوشی مورد محاسبه قرار گرفته اند و مقادیر مربوط به  $R_S$  و  $V'_N$  با استفاده از پتانسیل AW 95 محاسبه شد. منحنی  $P_{ICF}$  بر حسب رابطه فوق در نمودار شکل ۳ به صورت خط توپر نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود با افزایش بار هسته هدف و مهمتر شدن شکست کولنی مقدار  $P_{ICF}$  افزایش می یابد و نتایج حاصل از محاسبات حاضر با پیش بینی نیمه تجربی رابطه (۳) در شکل 2-d مقایسه شده است.



شکل شماره ۲: تغییرات احتمال همجوشی ناکامل در انرژی های مختلف برای سه واکنش (a)  $^{144}\text{Sm}$  و (b)  $^{89}\text{Y}$  و (c)

$^{124}\text{Sn}$

## بحث و نتیجه گیری :

سطح مقطع های CF و ICF برای واکنش های  $^9\text{Be}+^{124}\text{S}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{144}\text{Sm}$  با استفاده از مدل دینامیکی سه بعدی مسیریابی کلاسیکی مورد محاسبه قرار گرفته است. از پتانسیل های هسته ای به فرم AW 95 به عنوان پتانسیل کانال ورودی استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که در نظر گرفتن اثرات شکست پرتابه در محاسبه سطح مقطع ها از اهمیت زیادی برخوردار است. این موضوع در شکل ۱ با توجه به توافق خوب بین سطح مقطع های محاسبه شده و داده های تجربی متناظر به خوبی نمایان است. با استفاده از این نتایج،  $P_{ICF}$  برای سه واکنش فوق مورد محاسبه قرار گرفته است (شکل ۲ را ببینید). نتایج بدست آمده برای واکنش  $^9\text{Be}$  با هسته های  $^{124}\text{Sn}$  و  $^{89}\text{Y}$  برای این پارامترها، در توافق خوبی با خط پیش بینی تجربی قرار دارد. اگرچه در مورد واکنش  $^9\text{Be}+^{144}\text{Sm}$  ما بین داده تجربی  $P_{ICF}$  با مقدار محاسبه شده در این کار توافق نسبتا خوبی وجود دارد اما خط نیمه تجربی این مقادیر را بزرگتر نشان می دهد. این موضوع ممکن است به ماهیت کیفی این خط مرتبط باشد. به هر صورت تغییرات  $P_{ICF}$  بر حسب  $Z_T$  برای واکنش های مذکور بررسی شده است که در مورد واکنش های با  $^{124}\text{Sn}$  و  $^{89}\text{Y}$  نشان دهنده اهمیت اثر بار هسته هدف در میزان احتمال رخداد همجوشی ناکامل می باشد.

## مراجع :

- [1] L. F. Canto, P. R. S. Gomes, R. Donangelo, Phys. Rep. **424**, (2006) 1.
- [۲] D. J. Hinde, M. Dasgupta, Phys. Rev. C **81**, (2010) 064611.
- [۳] H. Esbensen, Phys. Rev. C **81**, (2010) 034606.
- [۴] L. F. Canto *et. al.*, Phys. Rev. C **80**, (2009) 034615.
- [۵] J. Zhang, C. Wang. Nucl. Phys. A **864** (2011) 128.
- [۶] P. R. S. Gomes *et. al.*, Phys. Rev. C **84**, (2011) 014615.
- [۷] A. D. Torres *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, (2007) 152701.
- [۸] V. V. Parkar *et. al.*, Phys. Rev. C **82**, (2010) 054601.
- [۹] C. S. Palshetkar *et. al.*, Phys. Rev. C **82**, (2010) 044608.
- [۱۰] P. R. S. Gomes *et. al.*, Phys. Rev. C **73**, (2006) 064606.
- [۱۱] I. Dutt, R. K. Puri, Phys. Rev. C **81**, (2010) 064609.
- [۱۲] A. Winther, Nucl. Phys. A **594**, (1995) 203.
- [۱۳] C. Y. Wong, Phys. Rev. Lett. **31**, 766 (1973).
- [۱۴] K. Hagino, N. Rowley, A.T. Kruppa, Com. Phys. Commun. **123** (1999) 143.
- [۱۵] R. Rafiei *et. al.*, Phys. Rev. C **81**, (2010) 024601.
- [۱۶] A. Diaz-Torres, Com. Phys. Commun. **182**, (2011) 1100.
- [۱۷] J. Hinde *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, (2002) 272701.