

## مطالعه سنتز برخی از ایزوتوپ‌های هسته فلروویوم FI، واقع در جزیره پایداری و مقایسه پارامترهای سد همجوشی آنها

هادی اسلامی زاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه خلیج فارس بوشهر، بوشهر

پست الکترونیکی: eslamizadeh@pgu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۶/۰۷)

### چکیده

در تحقیق حاضر قصد داریم سنتز برخی از ایزوتوپ‌های هسته فلروویوم  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  واقع در جزیره پایداری را که از همجوشی یون‌های Ca با هسته‌های  $^{239}\text{Pu}$ ،  $^{240}\text{Pu}$ ،  $^{241}\text{Pu}$  و  $^{242}\text{Pu}$  خلق شده‌اند را مورد بررسی قرار دهیم و تأثیر جهت‌گیری‌های مختلف هسته‌های هدف را روی پارامترهای سد همجوشی بررسی نماییم. نشان خواهیم داد که زوایای برخورد هسته‌های هدف تأثیر بر پارامترهای سد همجوشی یون‌های  $^{48}\text{Ca}$  با ایزوتوپ‌های مختلف هسته Pu دارد، و پارامترهای سد همجوشی را نیز برای سنتز هسته‌های  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  به دست آورده و آنها را با همدیگر مقایسه خواهیم نمود. همچنین نشان خواهیم داد که کمینه انرژی لازم برای سنتز هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  به ترتیب برابر با  $184.16\text{ MeV}$ ،  $183.95\text{ MeV}$ ،  $183.75\text{ MeV}$  و  $183.56\text{ MeV}$  هستند. در خاتمه نیز در چارچوب مدل آماری سعی به برآورد سطح مقطع تشکیل هسته‌های باقیمانده  $^{287}\text{Fl}$  و  $^{286}\text{Fl}$  بعد از خروج سه و چهار نوترون از هسته‌های  $^{290}\text{Fl}$  نموده، و نتایج را با کارهای تجربی مقایسه خواهیم نمود. نشان خواهیم داد که در چارچوب مدل آماری به کار برده شده نتایج استخراج شده با کارهای تجربی در توافق هستند.

واژه‌های کلیدی: سنتز هسته‌های فوق سنگین، سطح مقطع همجوشی، جزیره پایداری

### ۱. مقدمه

هسته‌ها هیچ سدی وجود ندارد، و در صورت سنتز شدن سریعاً از طریق کانال شکافت واپاشی نموده و به هسته‌های سبک‌تر تبدیل می‌شوند. ولی بر اساس کارهای نظری و در نظر گرفتن اثرات پوسته‌ای مشخص گردیده است که ارتفاع سد شکافت در حوالی پوسته‌های پر با اعداد جادویی جدید  $Z=114$  و  $N=184$  غیر صفر است، یا به عبارت دیگر امکان سنتز هسته‌های فوق سنگین

یکی از دستاوردهای مهم فیزیک هسته‌ای در دو و سه دهه اخیر، پیش‌بینی جزیره پایداری و سنتز برخی از هسته‌های این جزیره بر حسب کارهای تجربی است. بر اساس نتایج مدل قطره‌ای [۱]، ارتفاع سد شکافت برای هسته‌های با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۱۰۴ صفر می‌شود. این به مفهوم آن است که در مقابل شکافت این

پرتابه و هدف و انرژی برانگیختگی هسته مرکب تشکیل شده، به سه دسته مختلف تقسیم می‌نمایند. که اینها عبارتند از همجوشی داغ، گرم و سرد. در فرایند همجوشی داغ انرژی برانگیختگی هسته مرکب تشکیل شده حدود  $40 \text{ MeV}$  و پرتابه‌ها معمولاً هسته‌های  $^{13}\text{C}$ ،  $^{15}\text{N}$ ،  $^{18}\text{O}$ ،  $^{19}\text{F}$ ،  $^{22}\text{Ne}$  و هسته‌های هدف اکتانیدها با اعداد اتمی  $90$  تا  $103$  هستند. در همجوشی گرم انرژی برانگیختگی هسته مرکب تشکیل شده حدود  $30 \text{ MeV}$  و پرتابه معمولاً هسته  $^{28}\text{Ca}$  و هسته‌های هدف معمولاً  $\text{Cm}$ ،  $\text{Cf}$ ،  $\text{Am}$ ،  $\text{Pu}$ ،  $\text{Np}$  و  $\text{U}$  انتخاب می‌شوند. در همجوشی سرد انرژی برانگیختگی هسته مرکب تشکیل شده بین  $10 \text{ MeV}$  تا  $20 \text{ MeV}$  و پرتابه‌ها معمولاً یون‌های  $^{70}\text{Zn}$ ،  $^{76}\text{Ge}$ ،  $^{84}\text{Se}$ ،  $^{86}\text{Kr}$  و هسته‌های هدف  $^{208}\text{Pb}$  و  $^{209}\text{Bi}$  انتخاب می‌شوند. باید دقت داشت، که در فرایند سنتز هسته‌های سنگین و فوق سنگین افزایش انرژی برانگیختگی بسیار مخرب هستند، چرا که با افزایش انرژی برانگیختگی احتمال واپاشی هسته سنتز شده افزایش می‌یابد. لذا همجوشی‌های سرد و گرم که در آنها انرژی برانگیختگی هسته سنتز شده کمتر از همجوشی‌های داغ است، روش مناسب‌تری جهت سنتز هسته‌های سنگین و فوق سنگین هستند. همچنین باید توجه داشت که در بعضی از واکنش‌های پیچیده هسته‌ای، ایزوتوپ‌های مختلفی از عناصر واقع در جزیره پایداری قابل سنتز هستند، لیکن به دلیل کمبود نوترون لازم در ساختار هسته‌های سنتز شده و کوچک‌تر بودن نیروی قوی هسته‌ای در مقابل نیروی کولنی، این هسته‌ها به سرعت واپاشی نموده و به هسته‌های سبک‌تر تبدیل می‌گردند. با توجه به این ویژگی به نظر می‌رسد که عناصر جزیره پایداری، خصوصیات متفاوتی داشته باشند به طوری که بتوان به طور مثال از آنها به عنوان سوخت‌های جدید در تولید انرژی استفاده نمود. در تحقیق حاضر قصد داریم سد در مقابل همجوشی یون‌های  $^{48}\text{Ca}$  با هسته‌های  $^{239}\text{Pu}$ ،  $^{240}\text{Pu}$ ،  $^{241}\text{Pu}$  و  $^{242}\text{Pu}$  را جهت سنتز هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  برآورد نماییم، و پارامترهای سد همجوشی یعنی موقعیت قله‌های سد همجوشی و ارتفاع آنها را با در نظر گرفتن تأثیر زوایای برخورد بین پرتابه و هدف تعیین نماییم. لازم به ذکر است که بر حسب تعیین ارتفاع

در حوالی این اعداد جادویی که به ناحیه جزیره پایداری معروف است وجود دارد. اگر چه نیمه عمر این هسته‌ها کوتاه است. لازم به ذکر است که سنگین‌ترین هسته‌ای را که در طبیعت می‌توان از سنگ معدن آن استخراج نمود، هسته اورانیم با  $Z = 92$  است. هسته‌های سنگین‌تر از اورانیم را می‌توان به شکل مصنوعی سنتز نمود. هسته‌های سنگین‌تر از اورانیم را می‌توان بر اساس واکنش‌های القایی پروتون یا گیراندازی نوترون توسط اورانیم در پرتوافکنی توسط رآکتورهای هسته‌ای با شار بالا یا در فرایند همجوشی یون‌ها با هسته‌های سنگین سنتز نمود. تا کنون تلاش‌های نظری و آزمایشگاهی گسترده‌ای جهت مطالعه همجوشی یون‌های سبک و متوسط با هسته‌های سنگین صورت گرفته، که منجر به سنتز عناصر سنگین و فوق سنگین زیادی گردیده است. یکی از عواملی که نقش بسیار مهمی در سنتز هسته‌های سنگین و فوق سنگین بازی می‌کند، پتانسیل برهم‌کنش یا به تعبیر بهتر سد در مقابل همجوشی است. پتانسیل برهم‌کنش را می‌توان بر حسب مجموع پتانسیل کولنی و پتانسیل هسته‌ای محاسبه نمود. برای برآورد پتانسیل هسته‌ای می‌توان از پتانسیل وود-ساکسون و یا پتانسیل همجواری استفاده نمود، که در عمل پتانسیل همجواری به دلیل سادگی مناسب‌تر است. لازم به ذکر است که برای سنتز هسته‌های سنگین و فوق سنگین، هسته پرتابه بایستی توسط شتاب‌دهنده شتاب داده شود تا بتواند بر دافعه کولنی غلبه یافته و به هسته هدف نزدیک گردد تا به واسطه نیروی قوی هسته‌ای جذب هسته هدف شده و هسته مرکب شکل گیرد. از طرفی فرایند شتاب دادن یون‌ها توسط شتاب دهنده‌ها بسیار پرهزینه است، از این رو قبل از انجام فرایند سنتز یک هسته معین مناسب‌تر است که بر حسب کارهای نظری نوع پرتابه و هدف و انرژی جنبشی مناسب برای پرتابه مشخص شود تا از تکرار آزمایش‌ها جلوگیری به عمل آید. بایستی توجه داشت که عوامل زیادی در فرایند همجوشی یون‌ها با هسته‌های سنگین مؤثرند که از آن جمله می‌توان به انرژی پرتابه، نوع هسته‌های پرتابه و هدف، تأثیر جهت‌گیری هسته‌های پرتابه و هدف حین فرایند همجوشی و همچنین به سد در مقابل همجوشی اشاره نمود [۲-۴]. به طور کلی فرایندهای همجوشی را بر حسب نوع

مدهای خروج نوترون و تابش گاما را نسبت به خروج ذرات باردار (به دلیل عدم وجود سد کولنی در مقابل خروج آنها) بیشتر ترجیح می‌دهد، از این رو در محاسبات می‌توان فقط خروج نوترون و تابش گاما را مد نظر قرار داد. تخمین احتمال کل برای تشکیل هسته‌های باقیمانده بعد از گسیل  $x$  نوترون و  $N$  تابش گاما از هسته مرکب را می‌توان به شکل زیر برآورد نمود [۷]

$$P_{ER} = \int_0^{E_0^* - E_n^{sep}(1)} \frac{\Gamma_n(E_0^*, J_0^*) P_n(E_0^*, e_1) de_1 \times \int_0^{E_1^* - E_n^{sep}(2)} \frac{\Gamma_n(E_1^*, J_1^*) P_n(E_1^*, e_2) de_2 \dots \times \int_0^{E_{x-1}^* - E_n^{sep}(x)} \frac{\Gamma_n(E_{x-1}^*, J_{x-1}^*) P_n(E_{x-1}^*, e_x) de_x \times G_{N\gamma}(E_x^*, J_x \rightarrow g.s.)}{\Gamma_{tot}} \quad (3)$$

که در آن  $\Gamma_n$  پهنای خروج نوترون، و  $\Gamma_{tot}$  پهنای واپاشی کل است، که از جمع پهنای جزئی خروج نوترون،  $\Gamma_n$ ، گاما،  $\Gamma_\gamma$ ، و پهنای شکافت،  $\Gamma_f$ ، تعیین می‌شود.  $e_k$  و  $E_n^{sep(k)}$  انرژی‌های جنبشی و بستگی نوترون  $k$ ام تابش شده هستند. انرژی برانگیختگی هسته، بعد از خروج نوترون  $k$ ام را می‌توان بر حسب رابطه  $E_k^* = E_0^* - \sum_{i=1}^k [E_n^{sep(i)} + e_i]$  محاسبه نمود. احتمال این که نوترون گسیلی از هسته دارای انرژی جنبشی  $e$  باشد را نیز می‌توان بر حسب رابطه  $P_n(E^*, e) = c\sqrt{e} \exp[-e/T(E^*)]$  تعیین نمود. که در این رابطه  $T$  دمای هسته و  $c$  ضریب بهنجارش است، که از شرط  $\int_0^{E_0^* - E_n^{sep}} P_n(E^*, e) de = 1$  قابل تعیین است. همچنین کمیت  $G$  احتمال این است که هسته بعد از تابش  $x$  نوترون مابقی انرژی برانگیختگی و اسپین خود را با گسیل  $N$  تابش گاما از دست داده و به حالت پایه دست یابد. کمیت  $G$  را می‌توان بر حسب پهنای جزئی گاما و پهنای واپاشی کل به شکل زیر برآورد نمود [۷]

$$G(E^*, J \rightarrow g.s.) = \prod_{i=1}^N \frac{\Gamma_\gamma(E_i^*, J_i)}{\Gamma_{tot}(E_i^*, J_i)} \quad (4)$$

سد همجوشی، می‌توان کمینه انرژی لازم جهت سنتز یک هسته مشخص را برآورد نمود.

## ۲. روش کار

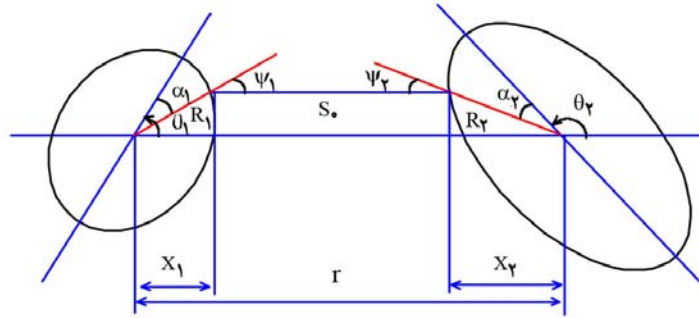
سطح مقطع شکل‌گیری هسته نهایی  $B$ ، که محصول گسیل ذرات از هسته مرکب  $C$  طی فرایند همجوشی هسته‌های  $A_1$  و  $A_2$  است ( $A_1 + A_2 \rightarrow C^* \rightarrow B + n, p, \alpha, \gamma$ ) را می‌توان بر حسب سطح مقطع جزئی گیراندازی پرتابه توسط هسته هدف،  $\sigma_c$ ، احتمال تشکیل هسته مرکب،  $P_{CN}$ ، و احتمال واپاشی هسته مرکب،  $P_{ER}$ ، به شکل زیر ارائه نمود [۵ و ۶]

$$\sigma^{A_1+A_2 \rightarrow B}_{ER}(E) = \sum_{l=0}^{\infty} \sigma_c(E, l) P_{CN}(E, l) P_{ER}(C \rightarrow B; E^*, J) \quad (1)$$

باید به این نکته توجه داشت که اندازه حرکت زاویه‌ای هسته مرکب سنتز شده طی فرایند همجوشی، وابسته به اندازه حرکت زاویه‌ای پرتابه می‌تواند دارای مقادیر مختلفی باشد. بنابراین طی برآورد سطح مقطع تشکیل هسته مرکب بایستی تمام احتمالات ممکن در فرایند تشکیل هسته مرکب در نظر گرفته شود. سطح مقطع گیراندازی جزئی پرتابه توسط هسته هدف را با فرض این که پرتابه دارای انرژی جنبشی  $E$  و اندازه حرکت زاویه‌ای  $l$  باشد را می‌توان به شکل زیر در نظر گرفت [۷]

$$\sigma_c(E, l) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} (\nu l + 1) T(E, l) \quad (2)$$

که  $T(E, l)$  احتمال نفوذ پرتابه در سد کولنی [۷] و  $\mu$  جرم کاهیده هسته‌های پرتابه و هدف است. بعد از تشکیل هسته مرکب با توجه به این که هسته با احتمال زیاد یکی از حالت‌های برانگیخته خود را اشغال می‌نماید، بنابراین سریعاً از طریق یکی از مدهای خروج ذره و یا فرایند شکافت واپاشی می‌نماید. احتمال بقا هسته مرکب سنتز شده  $P_{ER}(C \rightarrow B; E^*, J)$  (که  $E^*$  و  $J$  به ترتیب انرژی برانگیختگی و اسپین هسته مرکب هستند) بعد از گسیل ذرات یا تابش گاما را می‌توان در چارچوب مدل آماری [۷-۱۰] ارائه نمود. لازم به ذکر است که هسته مرکب سنتز شده جهت تخلیه انرژی،



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمای کلی بر خورد دو هسته تغییر شکل یافته که در یک صفحه قرار دارند.

بین دو هسته تغییر شکل یافته (غیرکروی) ارائه شده است. برای تعیین انرژی پتانسیل کولنی بین دو هسته تغییر شکل یافته که در یک صفحه قرار دارند ( $\varphi = 0^\circ$ ) می توان از رابطه زیر استفاده نمود [۷]

$$V_C = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + \sum_{\lambda, i=1,2} \frac{1}{2\lambda+1} \frac{R_i^\lambda(\alpha_i)}{r^{\lambda+1}} \times Y_\lambda^{(i)}(\theta_i) \left[ \beta_{\lambda i} + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta_{\lambda i}^* Y_\lambda^{(i)*}(\theta_i) \right], \quad (6)$$

برای برآورد پتانسیل هسته ای می توان از پتانسیل وود-ساکسون و یا پتانسیل همجواری استفاده نمود. پتانسیل وود-ساکسون را می توان به شکل زیر در نظر گرفت

$$V_{WS}(s_0) = -V_0 [1 + \exp(s_0/a)]^{-1}, \quad (7)$$

که در آن  $s_0$  فاصله جدایی بین نقاط برخورد دو هسته و  $a$  و  $V_0$  مقادیری ثابت بوده که برحسب هسته مرکب تشکیل شده تعیین می شوند. پتانسیل همجواری را نیز می توان به شکل زیر در نظر گرفت [۱۲]

$$V_N = \epsilon \pi \gamma \bar{R} b \Phi(s_0), \quad (8)$$

که  $b$  پارامتر کشش سطحی است، که مقدار آن برابر  $0.99 \text{ fm}$  و  $\gamma$  ضریب انرژی سطحی است که آن را می توان بر حسب رابطه زیر برآورد نمود [۱۲]

$$\gamma = 0.9517 \left( 1 - 1/7826 \left( \frac{N-Z}{A} \right)^2 \right) \text{ MeV fm}^{-2} \quad (9)$$

در تحقیق حاضر قصد داریم برای برآورد پتانسیل هسته ای از پتانسیل همجواری استفاده نماییم. موقعیت یک نقطه روی سطح هسته در زاویه  $\alpha$  نسبت به محور تقارن آن را می توان به شکل

که  $J_i = J - (i-1)$  و  $E_i^* = E^* - (i-1) \langle e_\gamma \rangle$  در رابطه بالا کمیت  $\langle e_\gamma \rangle$  انرژی متوسط تابش گاما است، که مقدار آن در بازه  $0.1 - 2.0 \text{ MeV}$  در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر احتمال تشکیل هسته مرکب،  $P_{CN}$ ، را مطابق با مدل آماری متعارف برابر یک فرض خواهیم نمود.

شرط انجام فرایند همجوشی یک پرتابه با هسته هدف، این است که پرتابه بتواند بر دافعه کولنی غلبه نموده و خود را به هسته هدف نزدیک نماید تا بواسطه نیروی قوی هسته ای جذب شده و هسته مرکب تشکیل گردد. سد در مقابل فرایند همجوشی میان هسته های پرتابه و هدف را می توان برحسب جمع انرژی های پتانسیل کولنی،  $V_C$ ، پتانسیل هسته ای،  $V_N$ ، و

$$\text{انرژی های بستگی هسته ها، } B_i, \text{ به شکل زیر تعیین نمود [۸]} \\ V = V_C(r, Z_i, \beta_{\lambda i}, \theta_i, \phi) + V_N(r, A_i, \beta_{\lambda i}, \theta_i, \phi) - \sum_{i=1}^2 B_i(A_i, Z_i) \quad (5)$$

که در آن  $r$  فاصله میان هسته های پرتابه و هدف،  $Z_1$  و  $Z_2$  اعداد اتمی هسته ها،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  زوایای محور تقارن هسته های پرتابه و هدف نسبت به راستای فرودی ذرات پرتابه، و  $\beta_{\lambda i}$  ثابت های تغییر شکل در هسته های پرتابه و هدف است [۱۱]. لازم به ذکر است که سد در مقابل همجوشی در حالتی که پرتابه و هدف هر دو کروی اند یا حداقل یکی از آنها کروی است، به دلیل کاهش نیروی دافعه کولنی دارای ارتفاع کمتری نسبت به حالتی که هر دو غیرکروی اند است. که این سبب تسهیل فرایند همجوشی پرتابه و هدف در سنتز یک هسته سنگین یا فوق سنگین می گردد. در شکل ۱، نمای کلی بر خورد

$$\Gamma_f^{BW} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\rho_{CN}(E^*)} \int_0^{E^* - B_f} \rho_{sad}(E^* - B_f - \varepsilon) d\varepsilon, \quad (17)$$

که  $\rho_{gs}$  و  $\rho_{sp}$  به ترتیب چگالی حالت‌ها در نقطه زینی و حالت زمینه است. پهنای تابش گاما را می‌توان بنا به داده‌های مرجع [۱۳] تعیین نمود

$$\Gamma_\gamma \cong \frac{3}{\rho_c(E^*)} \int_0^{E^*} d\varepsilon \rho_c(E^* - \varepsilon) f(\varepsilon) \quad (18)$$

در رابطه بالا  $\varepsilon$  انرژی تابش گامای خروجی از هسته، و تابع  $f(\varepsilon)$  نیز از مرجع [۱۳] تعیین می‌شود. پهنای خروج نوترون را نیز می‌توان بر حسب رابطه ارائه شده در مرجع [۱۴] به شکل زیر برآورد نمود

$$\Gamma_n = (\nu s_n + 1) \frac{m_n}{\pi^2 \hbar^2 \rho_c(E^*)} \int_0^{E^* - B_n} d\varepsilon_n \times \rho_R(E^* - B_n - \varepsilon_n) \varepsilon_n \sigma_{inv}(\varepsilon_n), \quad (19)$$

که در آن  $\rho_c$  و  $\rho_R$  نیز به ترتیب چگالی حالت‌های هسته مرکب و هسته باقی‌مانده،  $m_n$  جرم نوترون خروجی،  $s_n$  اسپین نوترون خروجی و  $\sigma_{inv}$  سطح مقطع معکوس [۱۴] است.

در محاسبات، چگالی حالت‌های یک هسته با انرژی برانگیختگی  $E^*$  و اسپین  $J$  را می‌توان از مراجع [۱۵] و [۱۶] و با در نظر گیری اثرات چرخشی و ارتعاشی هسته برآورد نمود.

لازم به ذکر است که طرز توصیف و شبیه‌سازی فرایند همجوشی یون‌های سبک با همدیگر [۱۷-۱۹] که معمولاً جهت تولید انرژی در نظر گرفته می‌شود، با فرایندهای همجوشی یون‌ها با هسته‌های سنگین که جهت سنتز هسته‌های سنگین و فوق سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند بسیار متفاوت است.

### ۳. نتایج و بحث نتایج

در شکل ۲ نتایج محاسبات سد در مقابل همجوشی یون‌های  $^{48}\text{Ca}$  با هسته‌های  $^{239}\text{Pu}$ ،  $^{240}\text{Pu}$ ،  $^{241}\text{Pu}$  و  $^{242}\text{Pu}$  جهت سنتز هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  بر حسب فاصله جدایی و زوایای مختلف برخورد بین پرتابه و هدف ارائه گردیده است.

زیر بر حسب هارمونیک‌های کروی بسط داد [۱۲]

$$R_i(\alpha_i) = R_{oi} \left[ 1 + \sum_{\lambda} \beta_{\lambda i} Y_{\lambda}^{(0)}(\alpha_i) \right], \quad (10)$$

که در آن  $\beta_{\lambda i}$  ثابت‌های تغییر شکل هسته‌ها هستند.  $R_{oi}$  به ازای  $i=1,2$  را می‌توان بر حسب رابطه زیر برآورد نمود [۱۲]

$$R_{oi} = 1.28 A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8 A_i^{-1/3} \quad (11)$$

شعاع میانگین،  $\bar{R}$ ، را نیز می‌توان بر حسب رابطه زیر محاسبه نمود [۱۲]

$$\frac{1}{\bar{R}^2} = \frac{1}{R_1 R_{1r}} + \frac{1}{R_2 R_{2r}} + \left[ \frac{1}{R_1 R_{1r}} + \frac{1}{R_2 R_{2r}} \right] \sin^2 \phi + \left[ \frac{1}{R_1 R_{1r}} + \frac{1}{R_2 R_{2r}} \right] \cos^2 \phi \quad (12)$$

که  $\phi$  زاویه سمتی بین سطح انحنای دو هسته است و مقادیر  $R_{1r}(\alpha_i)$  و  $R_{2r}(\alpha_i)$  را می‌توان بر حسب روابط زیر تعیین نمود

$$R_{1r}(\alpha_i) = \frac{\left[ R_1^*(\alpha_i) + R_1^{**}(\alpha_i) \right]^{3/2}}{R_1^*(\alpha_i) + 2R_1^{**}(\alpha_i) - R_1(\alpha_i)R_1^{**}(\alpha_i)}, \quad (13)$$

$$R_{2r}(\alpha_i) = \frac{R_2(\alpha_i) \sin \alpha_i}{\cos \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_i - \psi_i \right)}$$

که  $R_1^*$  و  $R_1^{**}$  به ترتیب مشتقات اول و دوم  $R_1$  هستند و مقادیر  $\psi_1$  و  $\psi_2$  را می‌توان بر حسب روابط زیر تعیین نمود

$$\psi_1 = \theta_1 - \alpha, \quad \psi_2 = 180 - \theta_2 - \alpha. \quad (14)$$

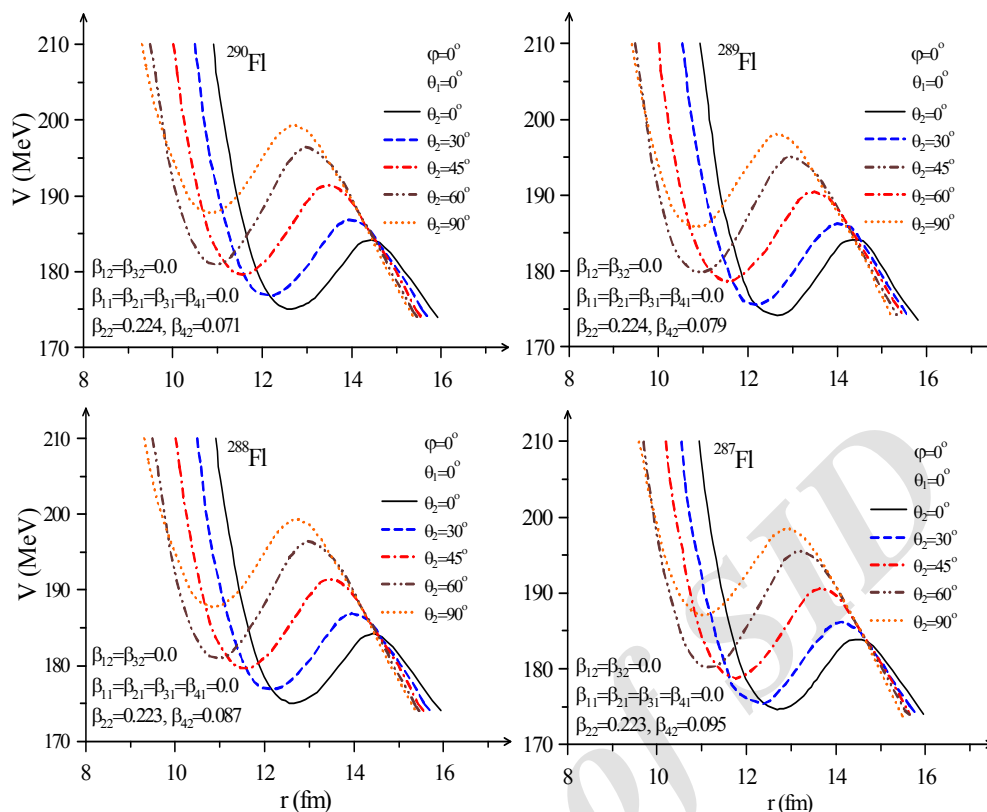
مقدار تابع  $\Phi(s_0)$  را نیز می‌توان بر حسب رابطه زیر ارائه نمود [۱۲]

$$\Phi(s_0) = \begin{cases} \frac{-1}{2} (s_0 - 2/54)^2 - 0/852 (s_0 - 2/54)^3 & \text{برای } s_0 \leq 1/2511 \\ -3/437 \exp\left(\frac{-s_0}{0/75}\right) & s_0 > 1/2511 \end{cases} \quad (15)$$

که  $s_0$  را مطابق شکل ۱ می‌توان به صورت زیر تعیین نمود

$$s_0 = r - X_1 - X_2 = r - R_1(\alpha_1) \cos(\psi_1) - R_2(\alpha_2) \cos(\psi_2), \quad (16)$$

در محاسبات جهت تخمین احتمال تشکیل هسته‌های باقیمانده احتیاج به برآورد پهنای واپاشی شکافت، گاما و پهنای واپاشی نوترون است. برای محاسبه پهنای شکافت یک هسته می‌توان از رابطه بوهر-ویلر [۱] استفاده نمود



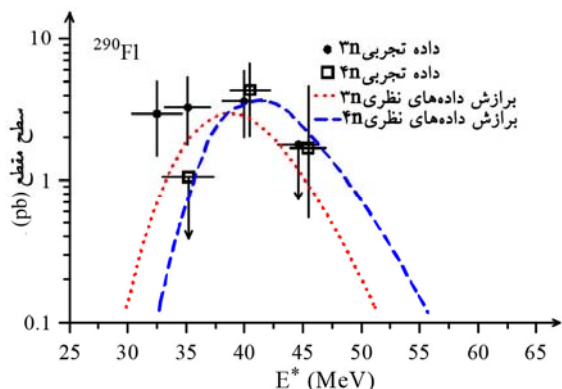
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سد در مقابل همجوشی یونهای  $^{28}\text{Ca}$  با هسته‌های  $^{242}\text{Pu}$ ،  $^{241}\text{Pu}$ ،  $^{240}\text{Pu}$ ،  $^{239}\text{Pu}$  و  $^{242}\text{Pu}$  بر حسب فاصله جدایی و جهت‌گیری‌های مختلف هسته هدف.

جدول ۱. پارامترهای ارتفاع و موقعیت قله سد در مقابل همجوشی یونهای  $^{48}\text{Ca}$  با هسته‌های  $^{242}\text{Pu}$ ،  $^{241}\text{Pu}$ ،  $^{240}\text{Pu}$ ،  $^{239}\text{Pu}$  جهت سستز هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  به ازای جهت‌گیری‌های مختلف هسته هدف.

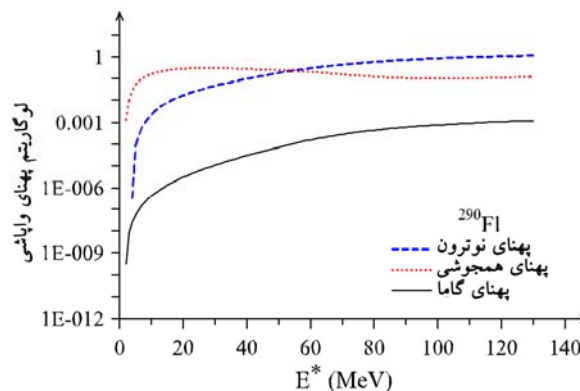
$(\theta_1^0 - \theta_2^0)$	$^{287}\text{Fl}$		$^{288}\text{Fl}$		$^{289}\text{Fl}$		$^{290}\text{Fl}$	
	$r_B(\text{fm})$	$V_B(\text{MeV})$	$r_B(\text{fm})$	$V_B(\text{MeV})$	$r_B(\text{fm})$	$V_B(\text{MeV})$	$r_B(\text{fm})$	$V_B(\text{MeV})$
(۰-۰)	۱۴,۴۶	۱۸۴,۱۶	۱۴,۴۹	۱۸۳,۹۵	۱۴,۴۷	۱۸۳,۷۵	۱۴,۵۰	۱۸۳,۵۶
(۰-۳۰)	۱۴,۰۱	۱۸۶,۸۶	۱۴,۰۶	۱۸۶,۶۵	۱۴,۰۲	۱۸۶,۴۶	۱۴,۰۸	۱۸۶,۲۶
(۰-۴۵)	۱۳,۴۸	۱۹۱,۳۲	۱۳,۵۰	۱۹۱,۱۱	۱۳,۴۹	۱۹۰,۹۱	۱۳,۵۱	۱۹۰,۷۲
(۰-۶۰)	۱۳,۰۱	۱۹۶,۲۹	۱۳,۱۲	۱۹۶,۰۸	۱۳,۰۳	۱۹۵,۸۷	۱۳,۱۵	۱۹۵,۶۷
(۰-۹۰)	۱۲,۶۹	۱۹۹,۳۰	۱۲,۷۰	۱۹۹,۱۱	۱۲,۶۹	۱۹۸,۹۰	۱۲,۷۱	۱۹۸,۷۱

مختلف هسته Pu به ازای جهت‌گیری‌های مختلف هسته هدف ارائه شده است. لازم به ذکر است که در محاسبه سد در مقابل همجوشی یونهای  $^{48}\text{Ca}$  با ایزوتوپ‌های مختلف هسته Pu زاویه  $\theta$  با توجه به شکل کروی  $^{48}\text{Ca}$  برابر با صفر در نظر گرفته شد و همچنین فرض شد که دو هسته حین فرایند

در شکل ۲ کاملاً مشخص است که پارامترهای سد همجوشی یعنی ارتفاع قله و موقعیت آن وابسته به جهت‌گیری هسته‌های هدف، طی فرایند همجوشی هسته‌های پرتابه و هدف هستند. در جدول ۱ نتایج مربوط به ارتفاع و موقعیت قله سد همجوشی طی فرایند همجوشی یونهای  $^{48}\text{Ca}$  با ایزوتوپ‌های



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سطح مقطع سنتز هسته‌های  $^{290}\text{Fl}$  و  $^{286}\text{Fl}$  بعد از گسیل سه و چهار نوترون از هسته‌های  $^{290}\text{Fl}$  وابسته به انرژی برانگیختگی. داده‌های تجربی از مرجع [۲۰] گرفته شده‌اند.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) پهنای مختلف واپاشی برای هسته  $^{290}\text{Fl}$  بر حسب انرژی برانگیختگی.

نوترون است. در تحقیق حاضر همچنین سعی به برآورد سطح مقطع باقی ماندن هسته‌های سنتز شده  $^{290}\text{Fl}$  بعد از گسیل سه و چهار نوترون در چارچوب مدل آماری ارائه شده در مراجع [۷-۱۰] نموده‌ایم. در شکل ۴ نتایج محاسبات سطح مقطع باقی ماندن هسته‌های سنتز شده  $^{290}\text{Fl}$  بعد از گسیل سه و چهار نوترون و تشکیل هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$  و  $^{286}\text{Fl}$  با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند.

از شکل ۴ کاملاً مشخص است که در ابتدا سطح مقطع تشکیل هسته  $^{287}\text{Fl}$  به واسطه خروج سه نوترون از هسته  $^{290}\text{Fl}$  افزایش یافته و بیشینه می‌شود، و سپس با افزایش انرژی برانگیختگی هسته مرکب سنتز شده سطح مقطع تشکیل هسته  $^{286}\text{Fl}$  به واسطه خروج چهار نوترون از هسته  $^{290}\text{Fl}$  افزایش می‌یابد. از نتایج به دست آمده برای سطح مقطع می‌توان نتیجه گرفت که در چارچوب مدل آماری به کار برده شده، می‌توان نتایج داده‌های تجربی مربوط به سطح مقطع باقی ماندن هسته‌های سنتز شده  $^{290}\text{Fl}$  بعد از گسیل سه و چهار نوترون را با توجه به میزان خطا اندازه‌گیری در کارهای تجربی به طور قابل قبولی باز تولید نمود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

از نتایج استخراج شده برای سد در مقابل همجوشی یون‌های

برخورد در یک صفحه واقع بوده، به طوری که  $\varphi = 0^\circ$  باشد. از مقایسه پارامترهای سد همجوشی در زوایای مختلف برخورد می‌توان نتیجه گرفت که کمترین ارتفاع سد همجوشی مربوط به زوایای برخورد  $(0-0^\circ)$  و بیشترین ارتفاع مربوط به زوایای  $(0-90^\circ)$  است. البته با توجه به کمتر بودن فاصله متوسط توزیع بار در برخورد  $(0-90^\circ)$  نسبت به برخورد  $(0-0^\circ)$  می‌توان انتظار چنین نتایجی را داشت. از داده‌های ارائه شده در جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت که حداقل مقدار انرژی لازم برای سنتز هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  مربوط به برخورد تحت زوایای  $(0-0^\circ)$  است، که ارتفاع‌های سد همجوشی دارای کمترین مقدار ممکن هستند. همچنین از نتایج استخراج شده کاملاً مشخص است که ارتفاع سد همجوشی هسته  $^{290}\text{Fl}$  طی برخورد  $(0-0^\circ)$ ، در بین ایزوتوپ‌های مختلف FI که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، داری کمترین مقدار ممکن است. که این به دلیل تعداد بیشتر نوترون در این هسته نسبت به ایزوتوپ‌های دیگر است، چرا که با افزایش تعداد نوترون در این هسته و غلبه بیشتر نیروی قوی هسته‌ای بر دافعه کولنی ارتفاع سد همجوشی اندکی بیشتر کاهش یافته است.

در شکل ۳ به طور نمونه پهنای مختلف واپاشی محاسبه شده، برای هسته  $^{290}\text{Fl}$  ارائه شده است. در این شکل مشخص است که انرژی آستانه تابش گاما کمتر از انرژی آستانه خروج

هستند، که می‌توان نتیجه گرفت که کمینه انرژی لازم برای سنتز هسته‌های فوق سنگین  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  مربوط به برخوردهای (۰-۰) است. همچنین نشان داده شد که ارتفاع سد همجوشی هسته  $^{290}\text{Fl}$  طی برخورد (۰-۰) داری کمترین مقدار ممکن در بین ایزوتوپ‌های مختلف Fl که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند است. در خاتمه نیز نشان داده شد که در چارچوب مدل آماری به کار برده شده، نتایج محاسبات برای سطح مقطع باقی ماندن هسته‌های سنتز شده  $^{290}\text{Fl}$  بعد از گسیل نوترون (با توجه به میزان خطا در اندازه‌گیری‌های تجربی) به طور مناسبی با داده‌های تجربی در توافق هستند.

$^{48}\text{Ca}$  با هسته‌های  $^{239}\text{Pu}$ ،  $^{240}\text{Pu}$ ،  $^{241}\text{Pu}$  و  $^{242}\text{Pu}$  جهت سنتز هسته‌های فوق سنگین  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای سد همجوشی یون‌های  $^{48}\text{Ca}$  با ایزوتوپ‌های مختلف هسته Pu وابسته به جهت‌گیری فضایی هسته‌های هدف حین فرایند همجوشی است. بر حسب نتایج به دست آمده، نشان داده شد که کمترین ارتفاع سد همجوشی مربوط به برخورد (۰-۰) و بیشترین ارتفاع مربوط به برخورد (۰-۹۰) است. همچنین نشان داده شد که ارتفاع‌های سد همجوشی در برخورد (۰-۰) برای هسته‌های  $^{287}\text{Fl}$ ،  $^{288}\text{Fl}$ ،  $^{289}\text{Fl}$  و  $^{290}\text{Fl}$  به ترتیب برابر با  $183.56\text{ MeV}$ ،  $183.75\text{ MeV}$ ،  $183.95\text{ MeV}$ ،  $184.16\text{ MeV}$

## مراجع

1. N Bohr and J A Wheeler, *Phys. Rev. C* **56** (1939) 426.
2. D Jain, R Kumar, and M K Sharma, *Nucl. Phys. A* **915** (2013) 106.
3. R K Gupta *et al.*, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **31** (2005) 631.
4. N Ghodsi and V Zanganeh, *Phys. Rev. C* **79** (2009) 044604.
5. G G Admian, N V Antonenko, and W Scheid, *Nucl. Phys. A* **678** (2000) 24.
6. A S Zubov *et al.*, *Phys. Rev. C* **68** (2003) 014616.
7. V I Zagrebaev *et al.*, *Phys. Rev. C* **65** (2000) 014607.
8. M Blann, *Phys. Rev. C* **21** (1980) 1770.
9. J R Grover and J Gilat, *Phys. Rev.* **157** (1967) 802.
10. R G Stokstad *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **36** (1976) 1529.
11. P Möller, J R Nix, W D Myers, and W J Swiatecki, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **59** (1995) 185.
12. R K Gupta, N Singh, and M Mahnhas, *Phys. Rev. C* **70** (2004) 034608.
13. J E Lynn, "The Theory of Neutron Resonance Reactions", Clarendon, Oxford (1968) 325.
14. M Blann, *Phys. Rev. C* **21** (1980) 1770.
15. A V Ignatyuk, K K Istekov, and G N Smirenkin, *Sov. J. Nucl. Phys.* **29** (1979) 450.
16. A V Ignatyuk, "Statistical Properties of Excited Atomic Nuclei", Energoatomizdat, Moscow (1983).
۱۷. ع قاسمی زاد، م ج طباطبائی، مجله پژوهش فیزیک ایران، **۱۰**، ۱ (۱۳۸۶) ۳۱.
17. A Ghasemizad and M J Tabatabai, *Iranian Journal of Physics Research*, **7**, 1 (2007) 31.
۱۸. س ظ کلانتری، ج اسماعیلی، مجله پژوهش فیزیک ایران، **۵**، ۲ (۱۳۸۴) ۷۵.
18. S Z Kalantari and J Esmaili, *Iranian Journal of Physics Research*, **5**, 2 (2005) 75.
۱۹. الف پروازیان، الف جاوانی، مجله پژوهش فیزیک ایران، **۱۰**، ۳ (۱۳۸۹) ۲۴۹.
19. A Parvazian and A Javani, *Iranian Journal of Physics Research*, **10**, 3 (2010) 249.
20. Y T Ogannessian, *et al.*, *Phys. Rev. C* **70** (2004) 064609.