

## شکافت سه گانه هسته $^{252}_{98}\text{Cf}$ به صورت $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$ و $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$

داریوش نادری و مرضیه ساعدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پست الکترونیکی: d.naderi@razi.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۶/۲۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۲/۱)

چکیده

در این مقاله با استفاده از مدل سه خوشه‌ای، شکافت سه گانه هسته  $^{252}_{98}\text{Cf}$  را مورد مطالعه قرار داده‌ایم. آرایش خطی و استوایی را برای مطالعه شکافت سه گانه زمانی که پاره‌های شکافت هسته‌های  $\text{Sn}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Ca}$  هستند، به کار برده و انرژی پتانسیل این آرایش‌ها را برای مقادیر زوج و فرد  $A_3$  محاسبه کرده‌ایم. همچنین، انرژی پتانسیل ترکیب‌های  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  با تحقیق بر روی اثر تعداد نوترون‌های پاره‌های شکافت مقایسه کرده‌ایم. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای ترکیب  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  با  $A_3$  زوج در آرایش خطی و استوایی، انرژی پتانسیل و احتمال نفوذ به ترتیب مقدارهای کمینه و بیشینه‌ای در  $A_3=48$  دارند، در حالی که برای مقدارهای فرد  $A_3$ ، مقدار کمینه برای انرژی پتانسیل و مقدار بیشینه برای احتمال عبور از سد در وضعیت  $A_3=49$  قرار می‌گیرد. برای ترکیب  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  در حالت‌های خطی و استوایی، مقدار کمینه انرژی پتانسیل و مقدار بیشینه‌ای احتمال عبور از سد، برای مقادیر فرد و زوج  $A_3$  به ترتیب در وضعیت‌های  $A_3=49$  و  $A_3=50$  قرار می‌گیرند. همچنین در بین همه ترکیب‌های ممکن کمترین مقدار انرژی پتانسیل و بیشترین مقدار احتمال عبور برای ترکیب  $^{132}_{50}\text{Sn} + ^{72}_{28}\text{Ni} + ^{48}_{20}\text{Ca}$  اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: شکافت سه گانه، حالت خطی، حالت استوایی، انرژی پتانسیل، احتمال نفوذ

### ۱. مقدمه

تقسیم یک هسته به سه پاره با جرم‌های کوچکتر، که شکافت سه گانه نامیده می‌شود، خیلی زود بعد از کشف شکافت، پیش بینی شد. اسویاتسکی [۱] در چهار چوب مدل قطره مایع نشان داد که شکافت به صورت پاره‌های سه گانه می‌تواند با شکافت دوگانه رقابت کند. برای همه هسته‌ها با پارامترهای شکافت

گسیل  $43/3 < \frac{Z^2}{A} < 30/5$  شکافت سه گانه مورد انتظار است. گسیل ذرات باردار سبک مانند  $^4_2\text{He}$ ،  $^{12}_6\text{C}$ ،  $^{16}_8\text{O}$  و  $^{24}_{12}\text{Mg}$  در شکافت سه گانه محتمل تر است. این نوع شکافت به طور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است [۲-۸]. در سال ۱۹۶۳ استروتنسکی [۹] شکل‌هایی از هسته‌های شکافته شده را تعیین کرد و نشان

تقسیم یک هسته به سه پاره با جرم‌های کوچکتر، که شکافت سه گانه نامیده می‌شود، خیلی زود بعد از کشف شکافت، پیش بینی شد. اسویاتسکی [۱] در چهار چوب مدل قطره مایع نشان داد که شکافت به صورت پاره‌های سه گانه می‌تواند با شکافت دوگانه رقابت کند. برای همه هسته‌ها با پارامترهای شکافت

$$V_{C_{ij}} = \frac{Z_i Z_j e^{\gamma}}{C_{ij}^s}, \quad (3)$$

و

$$C_{ij}^s = C_{ij} + s_{ij}, \quad (4)$$

$C_{ij}^s$  فاصله بین مراکز پاره‌های شکافت است. مجموع شعاع‌های پاره‌های برهم‌کنش کننده است، به طوری که شعاع هر پاره با رابطه  $C_x = r_0 \times A_x^{\frac{1}{3}}$  که در آن  $r_0 = 1/16 \text{ fm}$  و  $x = i, j, k$  است، بیان می‌شود. همچنین،  $s_{ij}$  فاصله جدایی سطح بین پاره‌هاست. پتانسیل جاذبه هسته‌ای دامنه کوتاه یوکاوا است که به شکل زیر بیان می‌شود

$$V_{N_{ij}} = -\nu \left( \frac{a}{r_0} \right) \sqrt{a_{\nu i} a_{\nu j}} \times \left[ g_i g_j \left( \nu + \frac{C_{ij}^s}{a} \right) - g_i f_i - g_j f_j \right] \frac{\exp\left(-\frac{C_{ij}^s}{a}\right)}{\frac{C_{ij}^s}{a}}, \quad (5)$$

تابع‌های  $g$  و  $f$  به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$g_k = \frac{C_k}{a} \cosh\left(\frac{C_k}{a}\right) - \sinh\left(\frac{C_k}{a}\right), \quad (6)$$

$$f_k = \left(\frac{C_k}{a}\right)^2 \sinh\left(\frac{C_k}{a}\right), \quad (7)$$

در اینجا  $C_k = r_0 \times A_k^{\frac{1}{3}}$  شعاع هسته مادر است.  $a = 0.68 \text{ fm}$  پارامتر ضریب پخش است. پارامتر عدم تقارن که به شکل  $a_{\nu k} = a_s (1 - \omega I^2)$  است با مقادیر  $a_s = 21.13 \text{ MeV}$  و  $\omega = 2/3$  و  $I = \frac{N-Z}{A}$  تعیین می‌شود.

در مورد آرایش خطی مراکز سه پاره بر روی یک خط راست هستند و پاره دوم بین پاره‌های اول و سوم است به عبارت دیگر داریم

$$s_{12} = s_{23} = s, \quad s_{13} = 2(C_2 + s), \quad (8)$$

همچنین، برای آرایش استوایی مراکز سه پاره در سه رأس یک مثلث قرار دارند یعنی داریم

$$s_{12} = s_{13} = s_{23} = s, \quad (9)$$

$s = 0$  مربوط به حالتی است که سه پاره شکافت در تماس با

داد که علاوه بر حالت تغییر شکل یافته معمولی با یک گردن، حالت‌های کشیده متنوع‌تری با دو و حتی سه گردن نیز وجود دارد. بعد از آن در سال ۱۹۷۴ دیل و گرینر [۱۰] نشان دادند که حالت خطی شکافت سه‌گانه ارجحیت دارد. نتایج یکسانی توسط رویر [۱۱] و منیماران به دست آمده است [۱۲].

اخیراً همه ترکیب‌های سه‌گانه ممکن برای شکافت هسته  $^{252}\text{Cf}$  در حالت خطی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. همچنین، حالت استوایی برای مطالعه شکافت سه‌گانه به کار برده شده است [۱۲-۱۴]. همچنین در مرجع [۱۵] برای این هسته شکافت سه‌گانه با پاره‌های شکافت  $\text{Sn}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Ca}$  مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از پایستگی تکانه و انرژی، انرژی جنبشی پاره‌های شکافت محاسبه گردیده است. ما در این مقاله شکافت سه‌گانه  $^{252}\text{Cf}$  را زمانی که پاره‌های شکافت هسته‌های  $\text{Sn}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Ca}$  هستند، بررسی کرده و شکافت این هسته را برای حالت‌های زوج و فرد  $A_3$  در آرایش‌های خطی و استوایی، تحقیق کرده‌ایم. همچنین، اثر تعداد نوترون‌های پاره‌های سه‌گانه بر روی پتانسیل و احتمال عبور از سد شکافت را برای آرایش‌های خطی و استوایی مورد مطالعه قرار داده‌ایم.

مقاله حاضر به صورت زیر بخش بندی شده است. در بخش دو محاسبات نظری مدل خوشه‌ای سه‌گانه را شرح می‌دهیم. نتایج به دست آمده در بخش سه ارائه شده‌اند. همچنین خلاصه و نتیجه‌گیری را در بخش چهار ارائه کرده‌ایم.

## ۲. محاسبات نظری

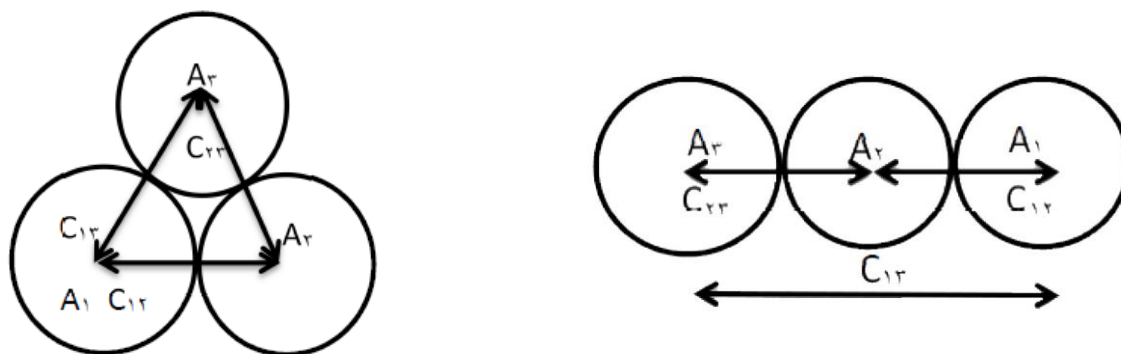
با استفاده از مدل سه‌خوشه‌ای، انرژی پتانسیل کل بین پاره‌های سه‌گانه به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶-۱۷]

$$V_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j>i}^3 (B_i + V_{ij}), \quad (1)$$

در این رابطه  $B_i$  انرژی بستگی پاره شکافت است که از مراجع [۱۸ و ۱۹] گرفته شده‌اند. همچنین داریم

$$V_{ij} = V_{C_{ij}} + V_{N_{ij}}, \quad (2)$$

که در آن  $V_{C_{ij}}$  انرژی برهم‌کنش کولنی بین سه هسته است به طوری که داریم



شکل ۱. سه‌پاره شکافت در نقطه تماس برای حالت خطی (سمت راست) و حالت استوایی (سمت چپ).

شده است. دو آرایش خطی و استوایی با محاسبه پتانسیل پراکندگی و احتمال نفوذ بررسی شده‌اند. همچنین با استفاده از مقایسه ترکیب‌های  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  اثر تعداد نوترون‌های اولین و دومین پاره بر پتانسیل و احتمال نفوذ را بررسی کرده‌ایم. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده‌اند.

شکل ۲ انرژی پتانسیل برای ترکیب  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  را در آرایش خطی و استوایی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار  $A_3$  تا ۴۸ انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش عدد جرمی پاره انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد. همچنین، می‌توانیم استنتاج کنیم که آرایش استوایی در مقایسه با مورد خطی مقدارهای بیشتری برای انرژی پتانسیل نتیجه می‌دهد. مقدار کمینه برای پتانسیل در  $A_3 = 48$  می‌تواند به دست آید. این بدان دلیل است که هسته  $^{48}_{28}\text{Ca}$  یک هسته جادویی دوگانه است. در قسمت سمت راست شکل ۲ تغییرات انرژی پتانسیل را برای ترکیب  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  نشان داده‌ایم. در این حالت آرایش  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  دارای کمترین انرژی پتانسیل است.

شکل ۳ مقایسه انرژی پتانسیل در نقطه تماس را برای برهم‌کنش‌های  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  در حالت آرایش خطی زمانی که  $A_3$  زوج است نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که مقدار کمینه انرژی پتانسیل برای برهم‌کنش‌های

هم قرار دارند. شکل آرایش‌های خطی و استوایی در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از تقریب WKB، می‌توانیم

احتمال نفوذ از سد را به صورت زیر محاسبه کنیم [۲۰]

$$P = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{2\mu_{123} [V(s) - Q]} ds\right], \quad (10)$$

در اینجا  $V(s)$  مجموع انرژی پتانسیل کولنی و هسته‌ای یا همان پتانسیل پراکندگی است.  $Q$  انرژی قابل دسترس برای سه‌پاره تولید شده است و از رابطه زیر تعیین می‌شود

$$Q = M - \sum_{i=1}^3 m_i, \quad (11)$$

در این رابطه  $M$  اضافه جرم هسته مادر و  $m_i$  اضافه جرم هسته‌های تولید شده هستند. همچنین  $\mu_{123}$  جرم کاهش یافته سه‌پاره است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\mu_{123} = \left( \frac{\mu_{12} A_3}{\mu_{12} + A_3} \right) m, \quad (12)$$

در اینجا  $m$  جرم نوکلئون است و

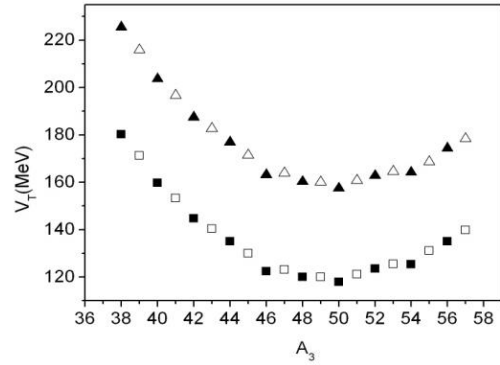
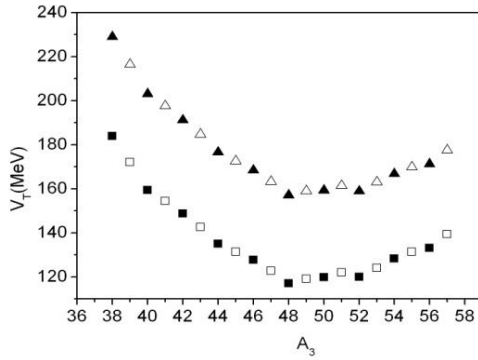
$$\mu_{12} = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}. \quad (13)$$

انتگرال در معادله (۱۰) می‌تواند به صورت تحلیلی یا عددی حل شود، حد پایین انتگرال  $s_1 = 0$  و حد بالای آن از رابطه زیر تعیین می‌شود

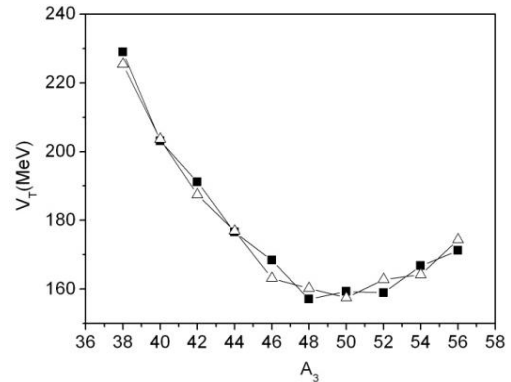
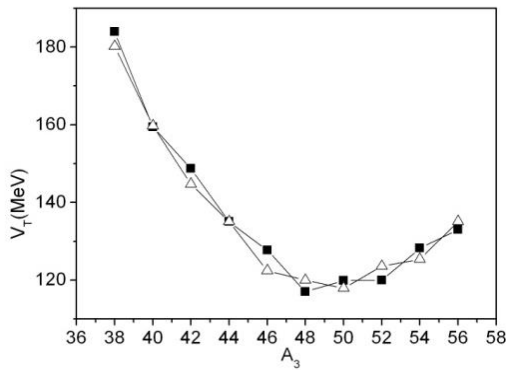
$$V(s_2) = Q. \quad (14)$$

### ۳. نتایج

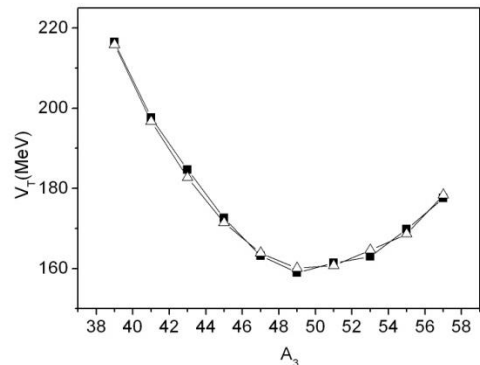
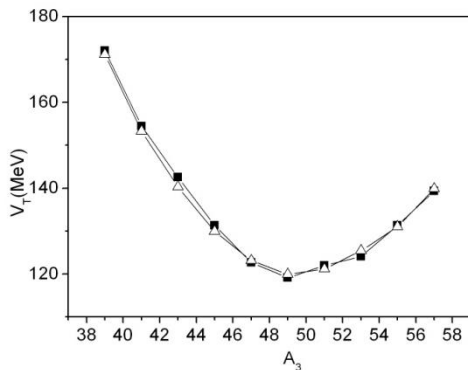
انرژی پتانسیل برای شکافت سه‌گانه  $^{252}_{98}\text{Cf}$  زمانی که سه‌پاره شکافت هسته‌های  $^{A_1}_{50}\text{Sn}$ ،  $^{A_2}_{28}\text{Ni}$  و  $^{A_3}_{20}\text{Ca}$  هستند، محاسبه



شکل ۲. انرژی پتانسیل برای ترکیب  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  در نقطه تماس سه پاره شکافت در سمت چپ نشان داده شده است. علائم توپر و توخالی به ترتیب نتایج را برای  $A_3$  زوج و فرد نشان می‌دهد. همچنین، مربع‌ها و مثلث‌ها به ترتیب نتایج برای حالت خطی و استوایی پاره‌ها هستند. در سمت راست نتایج برای حالت  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  نشان داده شده است.



شکل ۳. مقایسه انرژی پتانسیل ترکیب‌های  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  (مربع‌های توپر) و  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  (مثلث‌های توخالی) برای حالت خطی (سمت چپ). در اینجا  $A_3$  زوج است. همچنین در سمت راست نتایج برای حالت استوایی نشان داده شده است.



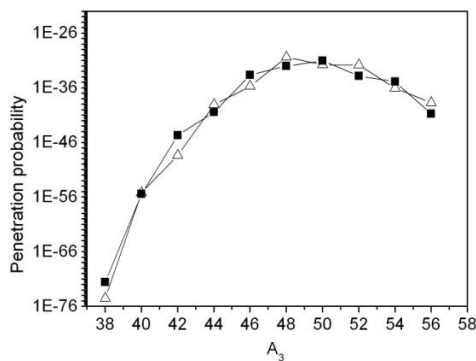
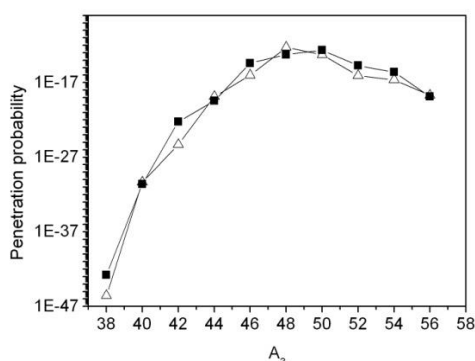
شکل ۴. انرژی پتانسیل در نقطه تماس سه پاره شکافت برای ترکیب‌های  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  (مربع‌های توپر) و  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  (مثلث‌های توخالی) در حالت خطی (سمت چپ). در اینجا  $A_3$  فرد است. نتایج برای حالت استوایی پاره‌ها در سمت راست نشان داده شده‌اند.

استوایی به دست می‌آید.

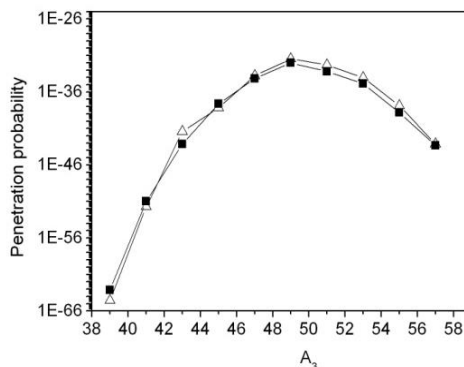
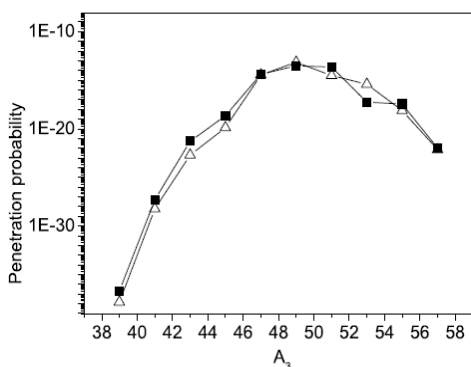
در شکل ۴ انرژی پتانسیل در نقطه تماس سه پاره برای ترکیب‌های  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  و

$A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  و  $A_{50}Sn + A_r Ni + A_r Ca$  به

ترتیب در حالت‌های  $A_3 = 48$  و  $A_3 = 50$  قرار می‌گیرد. همچنین نتایج یکسانی از قسمت راست شکل ۳ برای حالت



شکل ۵. احتمال نفوذ به صورت تابعی از عدد جرمی پاره سوم (زوج) برای حالت خطی (سمت چپ) و حالت استوایی (سمت راست). مثلث‌های توخالی و مربع‌های توپر به ترتیب نتایج برای ترکیب‌های  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و هستند.



شکل ۶. احتمال نفوذ به صورت تابعی از عدد جرمی پاره سوم (فرد) برای آرایش خطی (سمت چپ) و برای حالت استوایی (سمت راست). مثلث‌های توخالی و مربع‌های توپر به ترتیب نتایج به دست آمده برای ترکیب‌های  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  هستند.

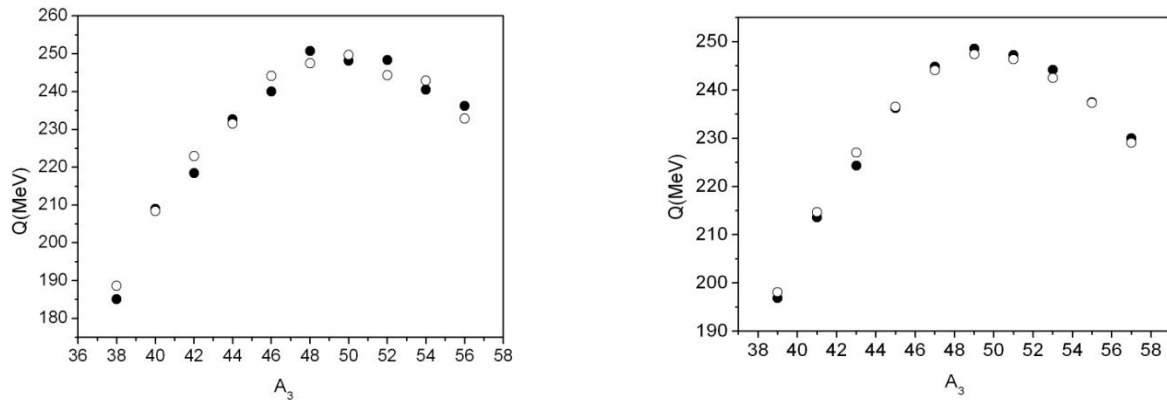
$^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  مقادیرهای بیشینه به ترتیب مربوط به  $A_3 = 48$  و  $A_3 = 50$  هستند.

از شکل ۶ می‌توان استنتاج کرد که در مورد خطی با مقادیرهای فرد  $A_3$  برای  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  $^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  احتمال نفوذ، مقدار بیشینه‌ای در  $A_3 = 49$  دارد. می‌توان نتایج یکسانی از شکل ۵ در مقایسه با شکل ۶ استنتاج کرد. همچنین، کمترین مقدار انرژی پتانسیل و بیشترین مقدار احتمال نفوذ برای آرایش  $^{132}_{50}\text{Sn} + ^{72}_{28}\text{Ni} + ^{48}_{20}\text{Ca}$  اتفاق می‌افتد زیرا  $^{48}_{20}\text{Ca}$  و  $^{132}_{50}\text{Sn}$  هسته‌های جادویی دوگانه هستند و  $^{72}_{28}\text{Ni}$  یک هسته جادویی یگانه است.

باید به این نکته اشاره کرد که تغییر شکل پاره‌های شکافت می‌تواند بر روی احتمال نفوذ تأثیر گذار باشد. محاسبات انجام شده در کار حاضر بدون در نظر گرفتن این تغییر شکل‌ها و برای

$^{A_1-1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2+1}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  در حالت خطی زمانی که  $A_3$  فرد است محاسبه شده است. تفاوت بین دو برهم‌کنش با  $A_3$  فرد کمتر از موردی است که  $A_3$  زوج است. مقدار کمینه پتانسیل برای  $A_3 = 49$  اتفاق افتاده است. همچنین، می‌توان نتایج یکسانی برای حالت استوایی در قسمت سمت راست شکل ۴ استنتاج کرد. مقدار کمینه پتانسیل در وضعیت  $A_3 = 49$  قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر آرایش  $^{131}_{50}\text{Sn} + ^{72}_{28}\text{Ni} + ^{49}_{20}\text{Ca}$  کمترین انرژی پتانسیل را دارد.

احتمال نفوذ برای حالت‌های خطی و استوایی پاره‌ها محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده اند. شکل ۵ احتمال نفوذ را به صورت تابعی از عدد جرمی پاره سوم با مقدار زوج در حالت خطی نشان می‌دهد. برای ترکیب‌های  $^{A_1}_{50}\text{Sn} + ^{A_2}_{28}\text{Ni} + ^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و



شکل ۷. تغییرات  $Q$  واکنش بر حسب عدد جرمی پاره سوم زوج (سمت چپ) و فرد (سمت راست). دایره‌های توپر و توخالی به ترتیب مربوط به ترکیب‌های  ${}^{A_3}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3+1}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  ${}^{A_3}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  می‌باشند.

حالت‌های خطی و استوایی برای انرژی پتانسیل مقادیر کمینه‌ای در  $A_3 = 49$  نشان می‌دهند. همچنین، مقدار بیشینه احتمال نفوذ در آرایش‌های خطی و استوایی برای  $A_3 = 49$  به دست می‌آید. زمانی که  $A_3$  زوج است انرژی پتانسیل ترکیب‌های  ${}^{A_3-1}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3+1}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  ${}^{A_3}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  ترتیب در  $A_3 = 48$  و  $A_3 = 50$  مقادیر بیشینه‌ای را نشان می‌دهند. همچنین، مقادیر بیشینه احتمال نفوذ برای برهم‌کنش‌های  ${}^{A_3}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  ${}^{A_3-1}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3+1}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  به ترتیب در  $A_3 = 48$  و  $A_3 = 50$  قرار می‌گیرند. احتمال نفوذ، علاوه بر نحوه آرایش به تعداد نوترون‌های پاره‌های شکافت و  $Q$  واکنش نیز بستگی خواهد داشت.

حالت کروی پاره‌ها می‌باشد. در شکل ۷،  $Q$  واکنش بر حسب عدد جرمی پاره شکافت سوم را نشان داده‌ایم. با توجه به رابطه (۱۰) احتمال نفوذ به کمیت  $Q$  وابسته است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین مقدار  $Q$  مربوط به ترکیب  ${}^{132}_{50}\text{Sn} + {}^{72}_{28}\text{Ni} + {}^{48}_{20}\text{Ca}$  است. باید توجه کرد که اگر شکافت سه‌گانه را به صورت یک فرآیند دو مرحله‌ای در نظر بگیریم این مورد می‌تواند بر روی مقدار  $Q$  اثر بگذارد.

### خلاصه و نتیجه‌گیری

برای تشریح شکافت سه‌گانه هسته رادیواکتیو سنگین مدل سه‌خوشه‌ای را به کار بردیم. دو شکل از پاره‌های شکافت به صورت  ${}^{A_3-1}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3+1}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  و  ${}^{A_3}_{50}\text{Sn} + {}^{A_3}_{28}\text{Ni} + {}^{A_3}_{20}\text{Ca}$  با مقادیر زوج و فرد  $A_3$  را مورد مطالعه قرار دادیم.

### مراجع

1. W J Swiatecki, *Proceedings of the Second UN Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, United Nations, Geneva **15** (1958) 651.
2. C Wagemans and A J Deruytter, *Nucl. Phys. A* **194** (1972) 657.
3. J P Theobald, P Heeg, and M Mutterer, *Nucl. Phys. A* **502** (1989) 343.
4. S Vermote, C Wagemans, O Serot, J Heyse, J Van Gils, T Soldner, T Soldner, and P Geltenbort, *Nucl. Phys. A* **806** (2008) 1.
5. D N Poenaru, B Dobrescu, W Greiner, J H Hamilton, and AV Ramayya, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **26** (2000) L97.
6. S Thakur, R Kumar, K R Vijayaraghavan, and M Balasubramaniam, *Int. J. Mod. Phys. E* **22** (2013) 1350014.
7. G Farwell, E Segre, and C Wiegand, *Phys. Rev.* **71** (1947) 327.
8. R K Choudhury and V S Ramamurthy, *Phys. Rev. C* **18** (1978) 2213.

- Balasubramaniam, *Eur. Phys. J. A* **48** (2012) 27.
16. K Manimaran and M Balasubramaniam, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys* **37** (2010) 045104.
  17. K Manimaran and M Balasubramaniam, *Eur. Phys. J. A* **45** (2010) 293.
  18. G Audi and A H Wapstra, *Nucl. Phys. A* **595** (1995) 4.
  19. P Moller, J R Nix, W D Myers, and W J Swiatecki, *At. Data Nucl. Data Tables* **59** (1995) 185.
  20. S S Malik and R K Gupta, *Phys. Rev. C* **39** (1989) 1992.
  9. V M Strutinsky *et al.*, *Nucl. Phys.* **46** (1963) 639.
  10. H Diehl and W Greiner, *Nucl. Phys. A* **229** (1974) 29.
  11. G Royer, F Haddad, and J Mignen, *J. Phys. G.* **18** (1992) 2015.
  12. K Manimaran and M Balasubramaniam, *Phys. Rev. C* **83** (2011) 034609.
  13. K Manimaran and M Balasubramaniam, *Phys. Rev. C* **79** (2009) 024610.
  14. W von Oertzen, Y V Pyatkov, and D Kamanin, *Act. Phys. Pol. B* **44** (2013) 447.
  15. K R Vijayaraghavan, W von Oertzen, and M