

بررسی رفتار سهم شکافت هسته غیر مرکب در سیستم‌های شکافت القایی $^{32}_{16}\text{S} + ^{197}_{79}\text{Au}$

بر حسب انرژی پرتابه $^{32}_{16}\text{S} + ^{232}_{90}\text{Th}$ و $^{32}_{16}\text{S} + ^{208}_{82}\text{Pb}$

سعید، سهیلی*؛ مرتضی، خلیل، خلیلی؛ سعیده، فیروزی

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده

رفتار سهم شکافت هسته غیر مرکب (A_{NCN}) برای سه سیستم شکافت القایی $^{32}_{16}\text{S} + ^{197}_{79}\text{Au}$, $^{32}_{16}\text{S} + ^{232}_{90}\text{Th}$ و $^{32}_{16}\text{S} + ^{208}_{82}\text{Pb}$ با استفاده از مدل آماری نقطه زینی استاندارد بررسی شده است. بیشتر اوقات ارتفاع سد شکافت هسته مرکب از طریق مدل سیرک به دست می‌آید. در این کار برای محاسبه ارتفاع سد شکافت هسته مرکب (B_f) از مدل سیرک به همراه تصحیح B_f هسته مرکب در حالت پایه استفاده شده است. رفتار سهم شکافت هسته غیر مرکب این سیستم‌ها نشان می‌دهد در ناحیه انرژی نزدیک سد کولنی، این سهم ابتدا کاهش و پس از یک انرژی خاص شروع به افزایش می‌کند. به نظر می‌رسد کاهش مقدار سهم شکافت هسته غیر مرکب با سرعت بیشتری نسبت به افزایش آن اتفاق می‌افتد.

کلید واژه: شکافت القایی با یون سنگین، مدل آماری نقطه زینی استاندارد و شکافت هسته غیر مرکب.

مقدمه

در سال ۱۹۳۹ بوهر و ویلر مکانیسم شکافت هسته‌ای را از طریق مدل قطره مایعی مورد مطالعه قرار دادند. در این مدل، هسته‌ها به عنوان قطره مایع باردار شده و بدون هیچ گونه ساختاری در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت شرط پایداری هسته، کشش سطحی بیشتر نسبت به نیروی دافعه کولنی در قطره می‌باشد. به عبارت دیگر یک سد پتانسیل مانع از شکافت می‌شود. شکافت هسته مرکب در واکنش‌های یون سنگین با گسیل نوترون و همچنین به ازای دمای حدود 3 MeV با گسیل ذرات باردار رقابت می‌کند. با مطالعه واکنش‌های شکافت القایی به وسیله یون‌های سنگین می‌توان خصوصیات مکانیسم جوش-شکافت را مورد بحث و بررسی قرار داد. بدین وسیله می‌توانیم راه رسیدن به عناصری دارای فزون پروتون، فزونی نوترون و عناصر آبر سنگین را هموار کنیم.

در واکنش‌های شکافت القایی یون‌های سنگین دو فرآیند شکافت هسته مرکب (CNF) و شکافت هسته غیر مرکب (NCNF) در رقابت با یکدیگر هستند. هسته تشکیل شده از برخورد پرتابه و هدف در شکافت هسته

غیر مرکب قبل از رسیدن به تعادل شکافته می‌شود. اولین بار شکافت پیش از تعادل توسط رامامورتی^۱ و کاپور^۲ پیشنهاد شد [۱]. میزان این نوع شکافت (NCNF) به عواملی مانند انرژی پرتابه، عدد اتمی، عدد جرمی، اسپین، شکل و ساختار پوسته‌ای پرتابه و هدف بستگی دارد. در حالت کلی شکافت هسته غیر مرکب شامل سه نوع شبه شکافت، شکافت سریع و شکافت پیش از تعادل می‌باشد.

(۱) - شبه شکافت: به طور تجربی مشخص شده است که قسمت مهمی از سطح مقطع کل شکافت در واکنش‌های شکافت القایی با یون‌های سنگین (در محدوده انرژی کمتر از ۱۰ MeV به ازای هر نوکلئون هسته پرتابه) و دارای عدد جرمی بزرگتر از ۲۰ مربوط به فرآیند شبه شکافت می‌باشد [۱،۲]. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که هسته تشکیل شده بار الکتریکی زیادی داشته باشد. فرآیند شبه شکافت را می‌توان فرآیندی مابین برخورد غیر کثسان عمیق و جوش-شکافت در نظر گرفت که در آن مقداری از خاطره تشکیل هسته مرکب باقی می‌ماند.

(۲) - شکافت سریع: در این فرآیند به علت بالا بودن انرژی برانگیختگی و اندازه حرکت زاویه‌ای هسته مرکب، ارتفاع سد شکافت هسته مرکب بسیار ناچیز و تقریباً برابر با صفر می‌باشد. در اینصورت هسته مرکب فرصت رسیدن به تعادل در نقطه زینی را نخواهد داشت و قبل از رسیدن به تعادل شکافته می‌شود [۳]. این ویژگی در سیستم‌هایی با پارامتر شکافت پذیری بالا و انرژی‌های تابشی نسبتاً بالا اتفاق می‌افتد.

(۳) - شکافت پیش از تعادل: این فرآیند زمانی اتفاق می‌افتد که ارتفاع سد شکافت با دمای هسته مرکب قابل مقایسه باشد. در این حالت هسته پرتابه با کناره هسته هدف تغییر شکل یافته برخورد می‌کند و خاطره کانال ورودی حفظ می‌شود. این فرآیند حتی وقتی ارتفاع سد شکافت غیر صفر (برخلاف شکافت سریع) باشد نیز اتفاق می‌افتد و برای همه پرتابه‌ها (برخلاف فرآیند شبه شکافت که با پرتابه‌های $A > 20$ است) رخ می‌دهد [۳].

روش کار

یکی از راه‌های فهم مکانیسم جوش-شکافت به وسیله مطالعه کمیت توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در واکنش‌های شکافت القایی با یون‌های سنگین صورت می‌پذیرد. این کمیت را با مدل‌های متفاوتی می‌توانیم پیش‌بینی کنیم. یکی از این مدل‌ها، مدل آماری نقطه زینی استاندارد نام دارد. در این مدل، با بررسی هسته مرکب در حال شکافت و نحوه قرار گرفتن آن در نقطه زینی، می‌توانیم کمیت توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت را پیش‌بینی کنیم. بنا به تعریف نسبت توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در زاویه ۰ یا ۱۸۰ درجه بر توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در ۹۰ درجه را کمیت ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت تعریف می‌کنیم. مدل آماری نقطه زینی استاندارد، ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت را به اسپین کل هسته مرکب در نقطه زینی

^۱ Ramamurthy

^۲ Kapoor

و تصویر اسپین کل بر روی محور تقارن هسته مرکب ارتباط می‌دهد. با توجه به مدل (SSPSM)، ناهمسانگردی پاره‌های شکافت به صورت تقریبی زیر محاسبه می‌شود:

$$A \approx 1 + \frac{\langle I^2 \rangle \hbar^2}{4 I_{eff} T} \quad (1)$$

در این رابطه $\langle I^2 \rangle$ ، I_{eff} و T به ترتیب مربع اندازه حرکت زاویه‌ای، گشتاور لختی موثر و دمای هسته مرکب در نقطه زینی هستند. دمای هسته مرکب با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$T = \sqrt{\frac{E_{c.m.} + Q - B_f - E_R - v_{pre} E_n}{a}} \quad (2)$$

مطابق این رابطه $E_{c.m.}$ ، Q ، B_f ، E_R ، E_n و v_{pre} و a به ترتیب انرژی پرتابه در چارچوب مرکز جرم، مقدار Q واکنش، ارتفاع سد شکافت هسته مرکب، انرژی چرخشی هسته مرکب، کاهش انرژی برانگیختگی هسته مرکب به ازای گسیل هر نوترون، تعداد نوترون‌های گسیلی پیش از رسیدن هسته مرکب به نقطه زینی و پارامتر چگالی تراز هستند.

نتایج

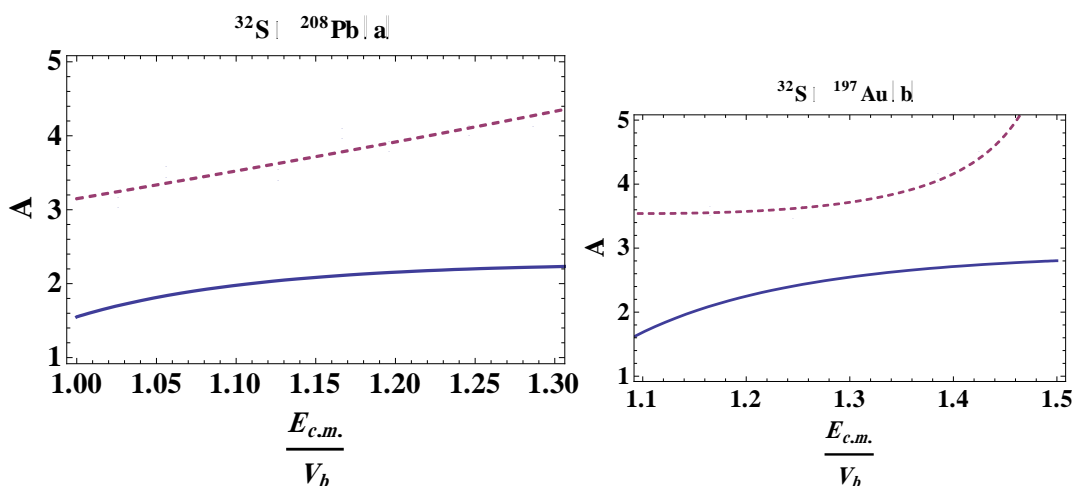
در محاسبه پیش بینی SSPSM، کمیت‌های I_{eff} و E_R با استفاده از مدل سیرک محاسبه شده‌اند [۴]. اخیراً B_f مربوط به هسته‌های زیادی در حالت پایه مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. بیشتر اوقات ارتفاع سد شکافت به دست آمده از مدل سیرک مقداری کمتر از اندازه‌گیری‌های تجربی است. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین مقادیر ارتفاع سد شکافت با استفاده از مدل سیرک و مرجع [۵] برای سیستم‌های بررسی شده در حالت پایه هسته مرکب آمده است.

جدول ۱: مقادیر B_f مربوط به سیستم‌های شکافت القایی $^{32}_{16}\text{S} + ^{184}_{74}\text{W}$ ، $^{197}_{79}\text{Au}$ ، $^{208}_{82}\text{Pb}$ در حالت پایه هسته مرکب.

سیستم‌های شکافت القایی	$^{32}_{16}\text{S} + ^{184}_{74}\text{W}$	$^{32}_{16}\text{S} + ^{197}_{79}\text{Au}$	$^{32}_{16}\text{S} + ^{208}_{82}\text{Pb}$
B_f با استفاده از مدل سیرک (MeV)	۵	۲,۵	۲
B_f مربوط به مرجع [۵] (MeV)	۱۲	۲,۵	۵



در این کار برای محاسبه B_f از مدل سیرک به همراه تصحیح ارتفاع سد شکافت هسته مرکب در حالت پایه استفاده شده است. مقادیر کمیت $\langle I^2 \rangle$ مربوط به این سیستم‌ها از مرجع [۲] گرفته شده است. در واکنش‌های فوق مقدار E_n برابر 10 MeV در نظر گرفته شده است و تعداد ν_{pre} از مراجع [۶] به دست آمده است. پارامتر چگالی تراز a عموماً بین $\frac{A_{C.N.}}{8}$ تا $\frac{A_{C.N.}}{11}$ اختیار می‌شود و در این کار به دلخواه این کمیت را برابر با $\frac{A_{C.N.}}{8}$ در نظر گرفته‌ایم ($A_{C.N.}$ عدد جرمی هسته مرکب می‌باشد). با در نظر گرفتن $\frac{A_{C.N.}}{11}$ به جای $\frac{A_{C.N.}}{8}$ در محاسبات پیش بینی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت اختلافی کمتر از ۱۲٪ مشاهده می‌شود [۷]. در شکل‌های زیر پیش بینی مدل به همراه مقادیر تجربی ناهمسانگردی پاره‌های شکافت برای سیستم‌های شکافت القایی $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}, ^{208}\text{Pb}$ آمده است.



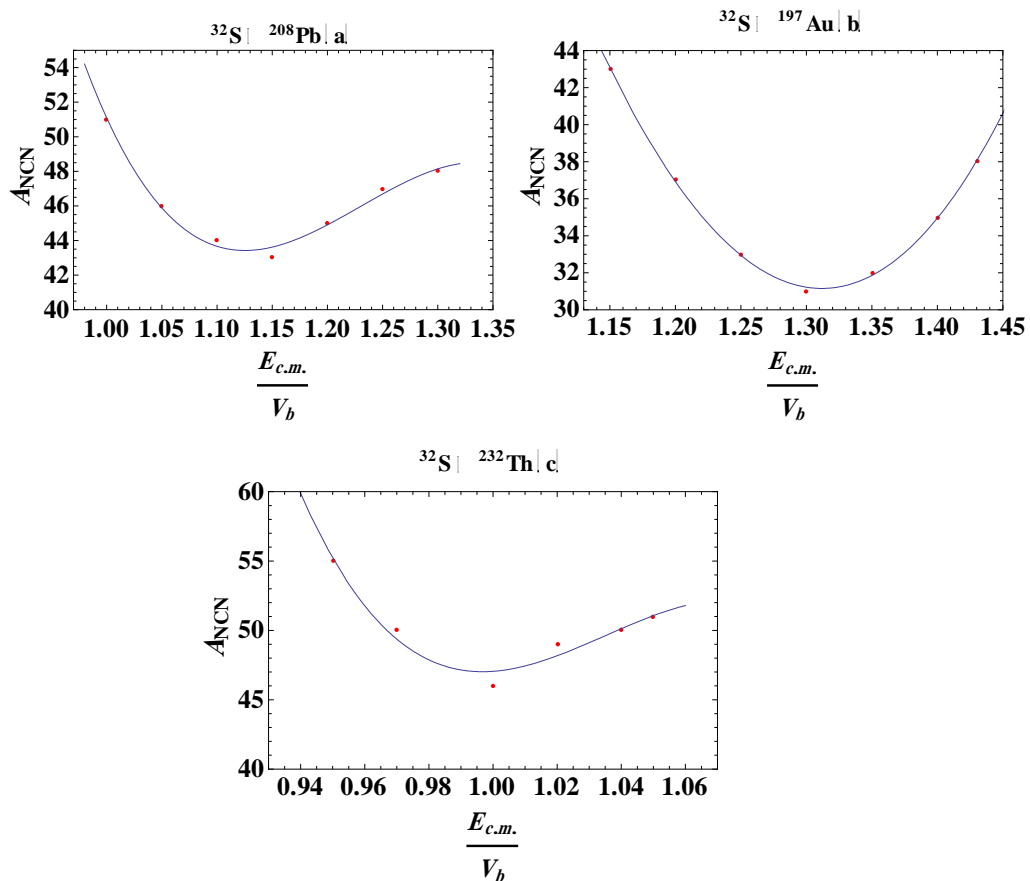
شکل ۱: ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت مربوط به سیستم‌های شکافت القایی $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}, ^{208}\text{Pb}$ بر حسب $\frac{E_{c.m.}}{V_b}$ ارتفاع سد کولنی است. (a) منحنی پُر و دایره‌های تو پُر به ترتیب پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد و مقادیر تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت مربوط به سیستم $^{32}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ هستند [۲]. (b) منحنی پُر و مربع‌های تو پُر به ترتیب پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد و مقادیر تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت مربوط به سیستم $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$ هستند [۲]. منحنی‌های خط چین برازش حاصل از مقادیر تجربی مربوط به هر یک از سیستم‌ها می‌باشد.

مدل آماری نقطه زینی استاندارد توانایی خوبی در پیش بینی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت حاصل از فرآیند جوش-شکافت دارد، همچنین سیستم‌های شکافت القایی دارای سهم شکافت هسته غیر مرکب، ناهمسانگردی زاویه‌ای تجربی بیشتری نسبت به پیش بینی این مدل دارند. از مقایسه پیش بینی مدل با مقادیر تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت می‌توان سهم شکافت هسته غیر مرکب را محاسبه کرد [۷]:

$$A_{NCN} = \frac{A_{exp} - A_{SSPSM}}{A_{exp}} \quad (3)$$



در این رابطه A_{NCN} سهم شکافت هسته غیر مرکب است و A_{exp} و A_{SSPSM} به ترتیب مقادیر تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای و پیش بینی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت با استفاده از مدل هستند [۷]. در شکل ۲ رفتار سهم شکافت هسته غیر مرکب برای سیستم‌های $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$, ^{208}Pb , ^{232}Th نشان داده شده است. رفتار این سهم در سیستم شکافت القایی $^{32}\text{S} + ^{232}\text{Th}$ با توجه به مرجع [۸] به دست آمده است.



شکل ۲: مقادیر محاسبه شده سهم شکافت هسته غیر مرکب مربوط به سیستم‌های شکافت القایی $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$, ^{208}Pb , ^{232}Th بر حسب $\frac{E_{c.m.}}{V_b}$ در نمودارهای (a)، (b) و (c) نقاط مقادیر این سهم را به ترتیب برای واکنش‌های $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$ ، $^{32}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ، $^{32}\text{S} + ^{232}\text{Th}$ و $^{32}\text{S} + ^{232}\text{Th}$ نشان می‌دهد و سهمی رسم شده منحنی برازش داده شده بر این مقادیر می‌باشد.

رفتار سهم شکافت هسته غیر مرکب برای سیستم‌های حاضر نشان می‌دهد به ازای انرژی‌های پرتابه نزدیک سد کولنی مقدار این سهم ابتدا کاهش و پس از انرژی خاصی شروع به افزایش می‌کند. شکافت پیش از تعادلی زمانی اتفاق می‌افتد که ارتفاع سد شکافت با دمای هسته مرکب قابل مقایسه باشد. چنین حالتی به ازای انرژی‌های تابشی کم اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد در انرژی‌های تابشی کم، شکافت پیش از تعادلی نقش مهمی در شکافت هسته غیر مرکب ایفا می‌کند و با افزایش انرژی پرتابه سهم شکافت پیش تعادلی کاهش می‌یابد. در



عوض با افزایش انرژی پرتابه، ارتفاع سد شکافت هسته مرکب کاهش یافته و شکافت سریع با احتمال بیشتر اتفاق می‌افتد. همچنین مطابق شکل ۲ با افزایش انرژی پرتابه کاهش سهم شکافت هسته غیر مرکب سریعتر از افزایش آن صورت می‌پذیرد. به نظر می‌رسد شکافت قبل از تعادل حساسیت زیادی به انرژی پرتابه دارد و این حساسیت برای شکافت سریع کمتر می‌باشد. انتظار داریم با افزایش عدد جرمی هسته هدف در واکنش‌های شکافت القایی با پرتابه ^{32}S ارتفاع سد شکافت هسته محصول کاهش یابد و در نتیجه فرآیند شکافت سریع در انرژی‌های تابشی پایین‌تر اتفاق افتد. این رفتار در شکل ۲ به وضوح قابل مشاهده است.

بحث و نتیجه‌گیری

سهم شکافت هسته غیر مرکب با استفاده از مقایسه‌ی پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد و مقادیر تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت برای سیستم‌های شکافت القایی $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$, ^{208}Pb , ^{232}Th محاسبه شده است. هسته پرتابه ^{32}S با عدد جرمی بیشتر از ۲۰ نشان‌دهنده وجود شکافت هسته غیر مرکب در سیستم‌های مورد بحث است. در شکل ۱ رفتار مقادیر تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای و پیش بینی مدل مشخص شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش عدد جرمی هدف مقدار سهم ANCN افزایش پیدا می‌کند. در ادامه نشان داده شده است با افزایش انرژی پرتابه، مقدار سهم شکافت هسته غیر مرکب کاهش می‌یابد و پس از انرژی خاصی این مقدار شروع به افزایش پیدا می‌کند. محاسبات نشان دادند برای این سیستم‌ها در محدوده انرژی نزدیک سد کولنی، کاهش مقدار شکافت هسته غیر مرکب سریعتر از افزایش آن است و با افزایش عدد جرمی هسته مرکب، فرآیند شکافت سریع در انرژی‌های تابشی پایین‌تر اتفاق می‌افتد.

مراجع

- 1- V. S. Ramamurthy and S. S. Kapoor, "Interpretation of Fission-Fragment Angular Distributions in Heavy-Ion Fusion Reactions" Phys. Rev. Lett. ۵۴, ۱۷۸-۱۸۲ (۱۹۸۵).
- 2- B. B. Back, R. R. Betts, J. E. Gindler, B. D. Wilkins, S. Saini, M. B. Tsang, C. K. Gelbke, W. G. Lynch, M. A. McMahan, and P. A. Baisden, "Angular distributions in heavy-ion-induced fission" Phys. Rev. C ۳۲, ۱۹۵-۲۱۳ (۱۹۸۵).
- 3- S. Kailas, "Heavy-ion induced fission at near barrier energies" Phys. Rep. ۲۸۴, ۳۸۱-۴۱۶ (۱۹۹۷).
- 4- A. J. Sierk, "Macroscopic model of rotating nuclei" Phys. Rev. C ۳۳, ۲۰۳۹-۲۰۵۳ (۱۹۸۶).
- 5- Peter Moller, Arnold J. Sierk, Takatoshi Ichikawa, Akira Iwamoto, Ragnar Bengtsson, Henrik Uhrenholt and Sven Aberg, "Heavy-element fission barriers" Phys. Rev. C ۷۹, ۰۶۴۳۰۴-۳۸ (۲۰۰۹).
- 6- D. O. Eremenko, V. A. Drozdov, M. H. Eslamizadex, S. Yu. Platonov, and O. A. Yuminov, "Stochastic Model of Tilting Mode in Nuclear Fission" Phys. At. Nucl. ۶۹, ۱۴۲۳-۱۴۲۷ (۲۰۰۶).
- 7- S. Soheyli and M. K. Khalili, "Non-compound-nucleus fission events and standard saddle-point statistical model" Phys. Rev. C ۸۵, ۰۳۴۶۱۰ (۲۰۱۲).
- 8- D. J. Hinde, A. C. Berriman, R. D. Butt, M. Dasgupta, I. I. Gontchar, C. R. Morton, A. Mukherjee, and J. O. Newton, "Role of Entrance-channel Dynamics in Heavy Element Synthesis" Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences ۳, ۳۱-۳۸ (۲۰۰۲).