

مروری بر سد شکافت سه قله ای هسته های ابر سنگین اکتینید و کاربردهای آن در محاسبه سطح مقطع شکافت

پهلوانی، محمد رضا^(۱) - مهدی پور کلدیانی، پیام*^(۲)

^(۱) دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته ای

^(۲) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نراق، گروه علوم پایه

چکیده

مدل سد شکافت سه کوهانه در دهه های هفتاد و هشتاد میلادی، مطرح و مورد توجه دانشمندان و پژوهشگران فیزیک هسته ای قرار گرفت. در دو دهه اخیر موضوع یاد شده دوباره مورد توجه محققان قرار گرفت و با استفاده از آن توانستند به نتایج مهمی دست یابند. در این مقاله، سدهای شکافت سه کوهانه را به منظور تشریح شکافت فوتونی هسته های اورانیوم، توریم، ..، مورد بررسی قرار داده ایم. مقادیر بیشینه و کمینه های سدهای سه کوهانی به دست آمده برای هسته های مختلف را بایکدیگر مقایسه نموده ایم. در انتها برای نشان دادن کارایی این پتانسیل از آن برای محاسبه سطح مقطع شکافت در اندرکنش شکافت فوتونی ایزوتوپ ^{238}U با استفاده از کد محاسباتی Empire استفاده نموده و سطح مقطع محاسبه شده را برحسب انرژی اشعه گاما در محدوده انرژی $4/5\text{ MeV}$ تا $7/5\text{ MeV}$ رسم نموده ایم. کلمات کلیدی: سد شکافت سه قله ای، تغییر شکل SD و HD، سطح مقطع شکافت، شکافت فوتونی

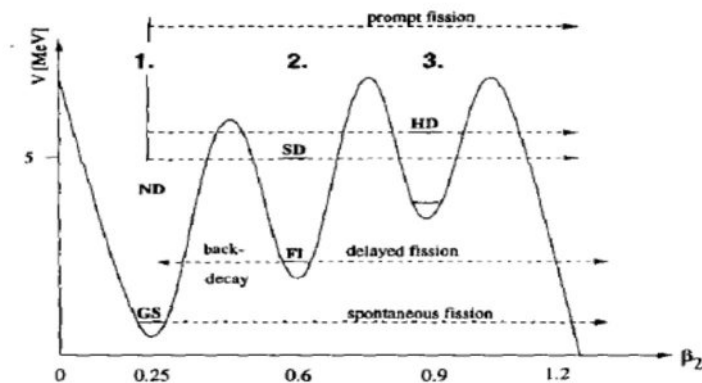
مقدمه

در بررسی فرایند شکافت (بصورت واداشته یا خودبخودی) با بکارگیری مدل قطره مایعی، اولین مسئله بدست آوردن سد شکافت هسته می باشد. با استفاده از اطلاعات تجربی شکافت خودبخودی نه تنها ارتفاع سد پتانسیل بلکه پهنای سد را نیز می توان بدست آورد. در ابتدا تصور دانشمندان هسته ای بر این بود که سد پتانسیل شکافت فقط دارای یک قله است، ولی در دهه هفتاد میلادی با مقایسه نتایج تجربی با مدل دو قله ای سد شکافت به نتایج قابل ملاحظه ای رسیدند که باعث شد دو قله ای بودن سد شکافت برای بسیاری از عناصر به اثبات برسد. زمان زیادی نگذشت تا فکر سه قله ای بودن سد شکافت برای هسته های سنگین اکتینید مورد توجه محققان قرار گیرد. در دهه هشتاد میلادی بعد از گذشت چند سال از اثبات دو قله ای بودن سد شکافت، بسیاری از محققان به سه قله ای بودن آن اذعان کردند [۴-۱]. دلیل وجود قله سوم را باید در مدل لایه ای یافت یعنی لایه جدید تشکیل شده در هسته های سنگین بشدت تغییر شکل یافته باعث ایجاد این قله می گردد. عموماً تغییر شکل هسته را به سه دسته می توان تقسیم کرد: تغییر شکل کوچک هسته (کلاس I)، مد ابر تغییر یا SD (کلاس II) و مد تغییر مافوق یا HD (کلاس III). تفاوت دو مد آخر

نسبت تغییر شکل دو قطر است که در مد SD برابر عدد دو است و در مدل HD این نسبت برابر عدد سه است (شکل ۱). بالطبع بررسی سد شکافت سه قله ای بیشتر در مد HD اتفاق می افتد. این تغییر شکل هم برای اسپین های کم و هم برای اسپینهای زیاد می تواند اتفاق افتد.

مدل سد شکافت سه قله ای

با مشاهده تغییر شکل زیاد یا HD که در اسپینهای بالای برای عناصر نادر رخ می دهد مطالعات روی این پتانسیل گسترش یافته است. دلیل این وقفه نسبتاً طولانی در بکارگیری مدل سد شکافت سه قله ای مطالعات را در پایین بودن دقت اندازه گیری ها انجام شده می توان جست. معمولاً اولین قله در سد شکافت را (اولین بیشینه در شکل ۱) سد داخلی و بیشینه آخر را سد خارجی می نامند (مفهوم سد خارجی بیشتر برای سد شکافت دو قله ای بکار می رود).



شکل ۱: پتانسیل سه قله ای و مقادیر تغییر فرم آن [۲].

در این مدل انرژی نقاط قله و چاه را با مقادیر انرژی E_i نشان می دهند و پتانسیل را از مجموع آن با مقدار انرژی نوسانی به دست می آورند. نکته مهم آن است که در نقاط قله پتانسیل نوسانی از انرژی کاسته می شود و در نقاط چاه با مقدار انرژی جمع می گردد؛ یعنی

$$V_{i(\beta)} = E_{fi} + (-1)^i \frac{1}{2} \mu h \omega_i (\beta - \beta_i)^2 \quad (1)$$

که مقدار ضریب نوسانی از $0.054A^{5/3} \text{ MeV}^{-1} \approx 5 \mu$ بدست می آید. در این رابطه μ به پارامتر لختی جرم معروف است. h دارای واحد مگا الکترون ولت ثانیه می باشد. β_i تغییر شکل محوری را نشان می دهد. مقدار i می تواند از یک تا ۵ تغییر می کند که به ترتیب مربوط به قله ها (بیشینه ها) و دره ها (کمینه ها) می باشد. شکل پتانسیل ها را عموماً به دو دسته اصلی تقسیم می کنند: مدل کشیده مقارن (SL) و مدل

استاندارد پادمقارن (۲) (ST). در مدل کشیده مقارن و مدل ST1 مقدار آخرین قله از مقدار قله قبلی بیشتر است در حالیکه در مدل ST2 آخرین قله از قله ماقبل در پتانسیل کمتر است. این نوع تقسیم بندی از پتانسیل اولین بار بوسیله بورسا [۶] بیان شده است.

ضرایب سد شکافت سه قله ای

در جدول های ۱ تا ۵ ضرایب مربوط به سد شکافت برای هسته های مختلف داده شده است. از این ضرایب برای محاسبه سطح مقطع استفاده می شود. در این جداول V_i ها مطابق فرمول (۱) بیان شده اند بطوریکه V_1 ، V_3 و V_5 مقادیر قله های اول تا سوم هستند و V_2 و V_4 مقادیر کمینه های پتانسیل می باشند. (شکل ۱) $h\omega_i$ ها نیز انرژی نوسانی متناظر با هر اکسترمم هستند.

جدول شماره ۱. ضرایب سد شکافت سه کوهانی برای هسته ^{238}U (بر حسب MeV) [۷].

ردیف	هسته مرکب	V_1	$h\omega_1$	V_2	$h\omega_2$	V_3	$h\omega_3$	V_4	$h\omega_4$	V_5	$h\omega_5$
۱	^{238}U	۴/۳	۰/۴	۲/۰۵	۱/۰	۵/۶	۰/۷	۶/۳	۱/۰	۵/۶	۰/۷

جدول شماره ۲. ضرایب سد شکافت سه کوهانی برای هسته های ^{233}Th و ^{232}Pa (بر حسب MeV) [۸].

ردیف	هسته مرکب	V_1	$h\omega_1$	V_2	$h\omega_2$	V_3	$h\omega_3$	V_4	$h\omega_4$	V_5	$h\omega_5$
۱	^{233}Th	۵/۸۲	۱/۰	۲/۱۲	۱/۰	۶/۳۵	۱/۳	۵/۶۵	۱/۰	۵/۴۵	۱/۳
۲	^{232}Pa	۵/۹۲	۰/۵	۱/۹۰	۱/۰	۶/۳	۱/۲	۵/۴۰	۱/۰	۶/۳۴	۱/۱۰

جدول شماره ۳. ضرایب سد شکافت سه قله ای برای ایزوتوپهای اورانیوم (بر حسب MeV) [۹].

ردیف	هسته مرکب	V_1	$h\omega_1$	V_2	$h\omega_2$	V_3	$h\omega_3$	V_4	$h\omega_4$	V_5	$h\omega_5$
۱	^{237}U	۵/۶۵	۰/۵			۶/۱۷	۰/۵۸			۵/۸۵	۰/۷
۲	^{238}U	۵/۸	۰/۶۵			۵/۸۹	۱/۹۷			۵/۶۵	۲/۱
۳	^{239}U	۶/۲۲	۰/۵۷			۶/۵۵	۲/۰۴			۵/۹۰	۱/۸۸

جدول شماره ۴. ضرایب سد شکافت دو قله و سه قله ای برای هسته ^{234}Th (بر حسب MeV) [۱۰].

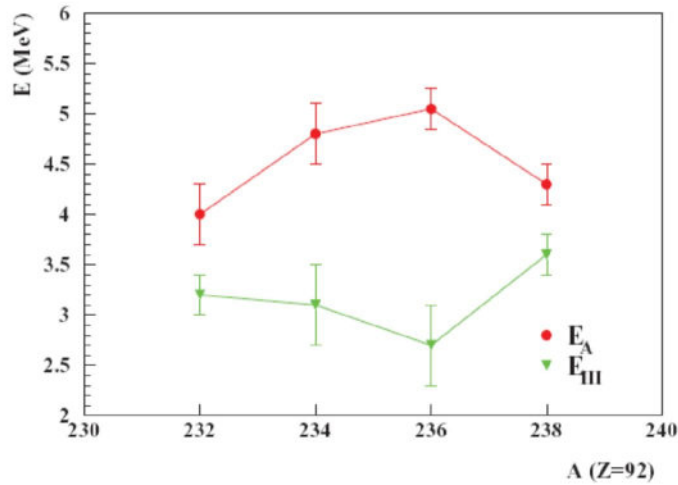
ردیف	هسته مرکب	V_1	$h\omega_1$	V_2	$h\omega_2$	V_3	$h\omega_3$	V_4	$h\omega_4$	V_5	$h\omega_5$
۱	^{234}Th	۶/۱۵	۱/۰	۳/۱	۱/۰	۶/۵	۰/۳۳	۵/۵	۰/۲۳	۵/۸	۰/۳۱
۲	^{234}Th	۶/۱۵	۱/۰	۳/۱	۱/۰	۶/۵	۰/۷۵				

جدول شماره ۵. پارامترهای سد شکافت دو و سه قله ای برای ایزوتوپهای امریسیم (بر حسب MeV) [۱۱].

ردیف	هسته مرکب	V_1	$h\omega_1$	V_2	$h\omega_2$	V_3	$h\omega_3$	V_4	$h\omega_4$	V_5	$h\omega_5$	شرح
۱	$^{240*}\text{Am}$	۶	۰/۳			۴/۵	۰/۴۹			۲/۱۵	۱/۰	
۲	$^{241*}\text{Am}$	۶/۳۵	۰/۳			۵/۱	۰/۴۹			۲/۱۵	۱/۰	
۳	$^{242*}\text{Am}$	۶/۳۲	۰/۶			۵/۷۸	۰/۴					مرجع [۱۲]
۴	$^{242*}\text{Am}$	۶/۴۹				۴/۷۲	۰/۳۸					مرجع [۱۳]
۵	$^{242*}\text{Am}$	۶/۶۱	۰/۸			۵/۵۶	۰/۵۵					مرجع [۴]
۶	$^{242*}\text{Am}$	۶/۳	۰/۶			۵/۸۸	۰/۳۹			۲/۱۲	۱/۰	
۷	$^{244*}\text{Am}$	۶/۲	۰/۵			۵/۹۵	۰/۴۷			۲/۸۰	۱/۰	
۸	$^{244*}\text{Am}$	۶/۰۷	۰/۷			۵/۸۹	۰/۴۷			۲/۸۰	۱/۰	

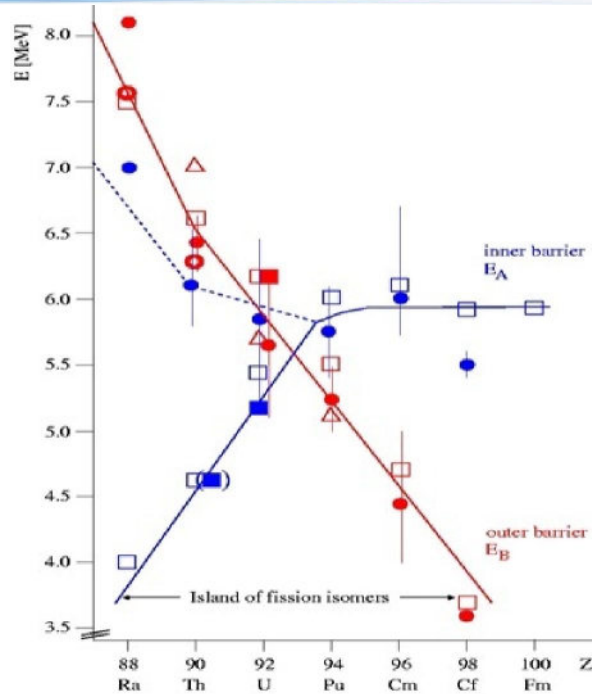
بحث و نتیجه گیری:

در این کار پژوهشی سد شکافت دو و سه قله ای و ضرایب مربوط به آنها برای ایزوتوپهای مختلف هسته ها با یکدیگر مقایسه و مقادیر کمینه و بیشینه سد پتانسیل با یکدیگر مقایسه شده اسیت. بعنوان نمونه در شکل ۲ مقادیر اولین بیشینه (خط قرمز) و آخرین کمینه (خط سبز) برای ایزوتوپهای زوج _زوج هسته اورانیوم با یکدیگر مقایسه شده اند. مقایسه نشان می دهد که اختلاف انرژی بین آنها از ۱ تا ۲ مگا الکترون ولت می باشد [۷].



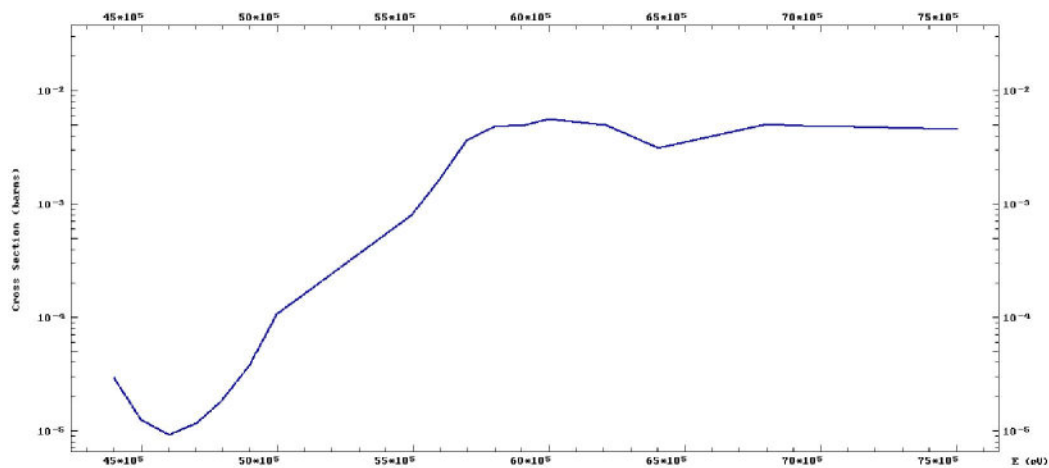
شکل ۲: مقایسه مقادیر اولین بیشینه و آخرین کمینه در ایزوتوپهای زوج-زوج هسته اورانیوم [۷].

همچنین این رفتار نشان می دهد که مقدار سد پتانسیل با افزایش تعداد نوترونها بازگشتی رابطه دارد یعنی مقدار پتانسیل ^{238}U به مقدار آن برای ^{232}U نزدیک می شود. از آنجا که مقدار آخرین سد پتانسیل بیشتر است پس می توان پیش بینی کرد که ایزوتوپهای اورانیوم از نوع ST2 اند. در شکل ۳ مقادیر سد پتانسیل داخلی و خارجی برای ایزوتوپهای زوج-زوج هسته های مختلف بر حسب عدد اتمی آنها رسم و با یکدیگر مقایسه شده اند. اختلاف برای دو هسته اورانیوم و پلوتونیوم کم است. در حالیکه برای سایر هسته ها به مقدار چند مگا الکترون ولت نیز می رسد [۳]. با توجه به شکل ۳ و جداول ارائه شده شاید بتوان نتیجه گرفت که مقادیر سد پتانسیل به انرژی ذرات فرودی و روش محاسبات بستگی دارند.



شکل ۳: مقادیر پتانسیل سد شکافت سه کوهانی برای هسته های زوج-زوج [۳]. مقادیر از مراجع مختلف می باشند: مربعهای توپر مرجع [۳]، مربعهای تو خالی مرجع [۱۴] و دایره ها مرجع [۱۵].

با استفاده از ضرایب سد پتانسیل سه کوهانی مورد بحث و با محاسبه احتمال نفوذ ذرات از این سد، سطح مقطع شکافت فوتونی ^{239}U از انرژی ۴ تا ۸ مگا الکترون ولت محاسبه و در شکل ۴ رسم شده است.



شکل ۴: سطح مقطع شکافت فوتونی با استفاده از سد شکافت سه کوهانی برحسب انرژی اشعه گاما برای هسته ^{239}U .

منابع

- [۱] B. S. Bhandari, Three-hump fission barrier in ^{232}Th , Phys. Rev. C 19, 1820 (1979).
- [۲] P.G. Thirolf and D. Habs, Spectroscopy in the Second and Third Minimum of Actinide Nuclei, Prog. Part.Nucl. Phys. 49, 325 (2002).
- [۳] A. Krasznahorkay, A. Habs, M. Hunyadi, D. Gassmann, M. Csatl'os, Y. Eisermann, T. Faestermann, G. Graw, J. Guly'as, R. Hertenberger, H. J. Maier, Z. M'at'e, A. Metz, J. Ott, P. Thirolf, and S. Y. van der Werf, On the excitation energy state in third minimum of ^{234}U , Phys. Lett. B461, 15 (1999).
- [۴] M. J. Lopez Jim'enez, B. Morillon, and P. Romain, Triple-humped fission barrier model for a new ^{238}U neutron cross-section evaluation and first validations, Ann. Nucl. Energy 32, 195 (2005).
- [۵] S. G. Nilsson, J. R. Nix, A. Sobiczewski, Z. Szymanski, S. Wycech, C. Gustafson, and P. Moller, On the spontaneous fission of nuclei with Z near 114 and N near 184, Nucl. Phys. A115, 545 (1968).
- [۶] Brosa, U. et al. 1990. Nuclear scission. Physics Reports. 197, 4 (1990), 167-262.
- [۷] Csige, L. et al. 2013. Exploring the multihumped fission barrier of ^{238}U via sub-barrier photofission. Phys. Rev. C. 87, 4 (2013).
- [۸] M. Sin et al. , Fission of light actinides: $^{232}\text{Th}(n, f)$ and $^{231}\text{Pa}(n, f)$ reactions, print in PHYSICAL REVIEW C 74, 014608 (2006)
- [۹] M. Lopez Jim'enez, et al. 2005. "Triple-humped fission barrier model for a new ^{238}U neutron cross-section evaluation and first validations". Annals of Nuclear Energy. 32, 2 (2005), 195-213.
- [۱۰] R.R. Chasman, Very extended minima in the A=180 mass region, Phys. Lett. B 302 (1993) 134.
- [۱۱] D. Rochman and et al., Modeling and Fission Cross Sections for Americium, Brookhaven National Lab; BNL-74667-2005 <https://www.bnl.gov/isd/documents/30133.pdf>
- [۱۲] V. M. Maslov, Modeling and Fission Cross Sections for Americium, INDC(BLR)-013, IAEA Final Report (1998)
- [۱۳] H. Weigmann and J. P. Theobald, Evaluation of fission barrier parameters from near-barrier fission and isomeric half-life data, Nucl. Phys. A 187, 305 (1972).
- [۱۴] Howard, Möller, CALCULATED FISSION BARRIERS, GROUND-STATE MASSES, AND PARTICLE SEPARATION ENERGIES FOR NUCLEI, ADNDT 25 (1980) 218
- [۱۵] Bjørnholm, S. and Lynn, J. The double-humped fission barrier. *Reviews of Modern Physics*. 52, 4 (1980), 725-931