

## برآورد زمان شکافت هسته های سنگین مرکب برانگیخته در چارچوب مدل استاتیکی

### رامین بحرانی فرد

سازمان انرژی اتمی، شرکت افق هسته ای

#### چکیده:

در این مقاله با در نظر گرفتن مدل استاتیکی شکافت، اطلاعاتی پیرامون زمان شکافت هسته  $^{238}\text{U}$  و همچنین تعداد نوترون های خروجی قبل از فرایند شکافت برای هسته های  $^{238}\text{U}$  و  $^{224}\text{Rn}$ ، به صورت تابعی از انرژی برانگیختگی ارائه خواهیم کرد. برای بدست آوردن خصوصیات سد شکافت از مدل های قطره ای و پوسته ای استفاده می کنیم. همچنین اثرات دما را روی سد شکافت در نظر خواهیم گرفت. در انتها تعداد نوترون های خروجی قبل از فرایند شکافت را، در چارچوب مدل استاتیکی، با داده های تجربی مقایسه می کنیم و نموداری از زمان شکافت برای هسته  $^{238}\text{U}$  ارائه خواهیم کرد.

**کلید واژه:** زمان شکافت، سد شکافت، پهنای شکافت، شکافت پذیری، مدل استاتیکی.

#### مقدمه:

اولین بار، کارهای تجربی Bateman [۱]، یک رابطه کلی را برای زنجیره واپاشی رادیواکتیو فراهم آورد. نسخه کاملا استاتیکی مسئله، هنگامی که از زمان صرف نظر شود، به صورت یک فرایند آبخاری چند کاناله است که همه واپاشی های مختلف هسته مرکب را شامل می شود و به خوبی با آزمایشات در توافق است. روابط اصلی وابسته به زمان Bateman را نیز، با توجه به اینکه پهنای واپاشی هسته مرکب مستقل از زمان هستند، می توان به آسانی برای فرایندهای چندکاناله بسط داد. برای مطالعات بیشتر به مراجع [۲ و ۳ و ۴] مراجعه کنید.

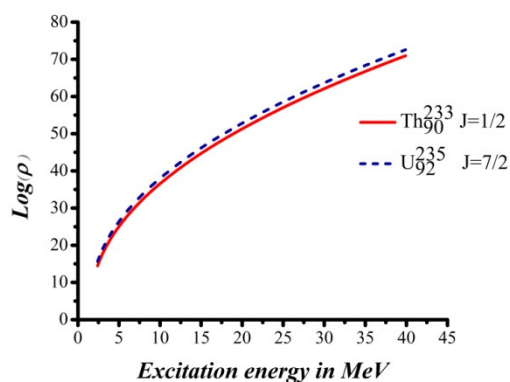
سنتز هسته های فرااورانیوم اغلب با واکنش های القایی صورت می پذیرد. پرتابه چنین واکنش هایی معمولا نوترون و گاهی یون های سنگین هستند. اما هسته های جدیدی که به واسطه همجوشی هسته- های سنگین و هسته

های سبک ایجاد می شوند، انرژی برانگیختگی بسیار زیادی دارند؛ به گونه ای که سد پتانسیل شکافت در چنین حالت هایی، ارتفاع بسیار کمی دارد و لذا موجبات ناپایداری زیاد چنین هسته هایی را فراهم می آورد و اغلب آنها خیلی سریع اقدام به تخلیه انرژی اضافی خود می کنند. تخلیه انرژی در چنین هسته هایی می تواند در شکل - های خروج نوترون، پروتون، آلفا و یا گسیل گاما باشد. همچنین احتمال رخداد شکافت در آنها بسیار زیاد است. لذا بررسی های احتمالات شکافت و خروج نوترون، همچنین زمان شکافت هسته مرکب از اهمیت ویژه عملی در چنین آزمایشات و فرایندهای سنتزی برخوردار هستند.

در این مقاله، سعی داریم با در نظر گرفتن مدل استاتیکی شکافت، اطلاعاتی پیرامون تعداد نوترون- های خروجی قبل از فرایند شکافت و همچنین زمان شکافت بدست آوریم. برای بدست آوردن خصوصیات سد شکافت، از مدل قطره مایع استفاده می کنیم؛ همچنین اثرات پوسته ای روی این مدل را بررسی می کنیم. سپس اثرات دما بر سد پتانسیل شکافت را مورد مطالعه قرار می دهیم. همچنین در تعیین چگالی ترازاها، از مدل فرمی گاز استفاده می - کنیم. در انتها با مشخص بودن همه پارامترهای احتمال فرایندهای ممکن (خروج نوترون، گسیل گاما و شکافت)، محاسبات تعداد نوترون خروجی پیش از شکافت و همچنین زمان شکافت هسته را در چارچوب مدل استاتیکی، مورد مطالعه قرار می دهیم و این اطلاعات را با داده های تجربی، مقایسه می - کنیم.

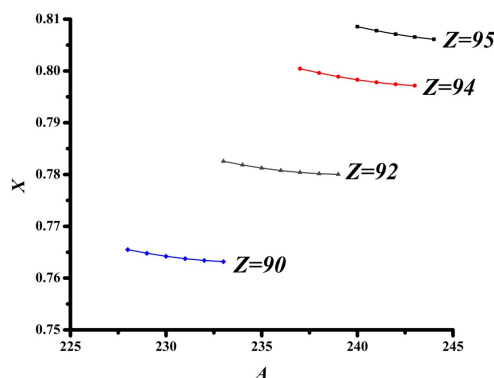
### روش کار:

برای محاسبه احتمالات کانال های مختلف واپاشی یک هسته مرکب، از مراجع [۲و۵] استفاده شده است. اگر به فرم چنین احتمال هایی دقت کنیم، در همه آنها یکی از پارامترهای اصلی، محاسبه چگالی حالت ها در حالت زمینه و نقطه زینی سد شکافت هسته مرکب، در انرژی برانگیختگی  $E^*$  و اسپین  $J$  می باشد. محاسبه  $E^*$  و  $J$  هسته مرکب براساس روش Strutinsky برای محاسبه سد شکافت، که در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد شد [۶]، صورت پذیرفته است. هنگامی که انرژی و اسپین هسته مرکب محاسبه شد، با استفاده از مدل فرمی گاز و با توجه به مرجع [۷]، می توان چگالی حالت ها را تعیین کرد. فرم چنین تابعی برای دو هسته مختلف و در حالت های اسپینی متفاوت، در شکل (۱) نشان داده شده اند.



شکل ۱- نمودار چگالی حالت های هسته ای بر اساس مدل فرمی گاز به صورت تابعی از انرژی برانگیختگی

از دیگر پارامترهای موثر در محاسبات احتمالات ذکر شده، شکافت پذیری هسته است. اگر از فرم کلی که برای سیستم های سنگین کاربرد دارد و توسط K. H. Schmidt و همکارانش در مرجع [۸] ارائه شده است، استفاده کنیم، پارامتر شکافت پذیری برای چهار گروه ایزوتوپ مختلف، به صورت شکل (۲) بدست می آیند.

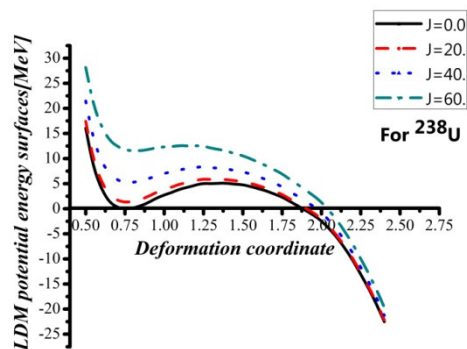


شکل ۲- پارامتر شکافت پذیری چهار گروه ایزوتوپ مختلف بر حسب عدد جرمی

همان گونه که در شکل (۲) قابل مشاهده است، با افزایش عدد اتمی، مقدار پارامتر شکافت پذیری به واحد نزدیک تر می شود. این امر سهل الوقوع بودن شکافت در هسته های سنگین تر را نشان می دهد.

قدم بعدی در تعیین چنین احتمالاتی، محاسبه سد شکافت مقابل هسته مرکب به صورت تابعی از پارامتر تغییر شکل هسته ای است. برای این کار از دو مدل قطره مایع و پوسته ای استفاده می شود و فرض می شود که پارامتر تغییر شکل، فاصله میان مرکز جرم های دو پاره باشد.

جهت ارائه سد پتانسیل شکافت مدل قطره ای می توان از جمع انرژی کشش سطحی و انرژی کولنی استفاده نمود. طرح چنین پتانسیلی برای هسته  $^{238}\text{U}$  به صورت تابعی از پارامتر تغییر شکل، در شکل (۳) ارائه گردیده است.

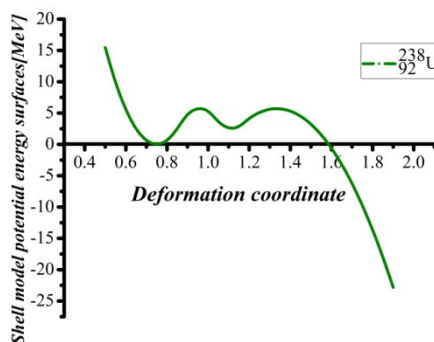


شکل ۳- نمودار سد شکافت تک کوهانه بر اساس مدل قطره ای برای هسته  $^{238}\text{U}$

قابل مشاهده است که این پتانسیل، نسبت به تغییرات اسپین هسته مرکب، بسیار حساس می باشد؛ هر چه تکانه زاویه ای بیشتر شود، عمق چاه پتانسیل این مدل کاهش می یابد. به چنین پتانسیلی، پتانسیل شکافت تک کوهانه می گویند. یکی از دلایلی که در انرژی ها و تکانه های زاویه ای زیاد، احتمال شکافت بالا می رود، این است که با افزایش تکانه زاویه ای، ارتفاع سد شکافت تک کوهانه کم شده و لذا پایداری هسته در مقابل شکافت کاهش می یابد.

پتانسیل شکافت مدل پوسته ای، یک طرح دوکوهانه دارد. برای محاسبه چنین پتانسیلی بر حسب پارامتر تغییر شکل مورد نظر، از مرجع [۹] استفاده کردیم. طرح سد پتانسیل شکافت دوکوهانه برای هسته  $^{238}\text{U}$  به صورت تابعی از پارامتر تغییر شکل، در شکل (۴) ارائه شده است.

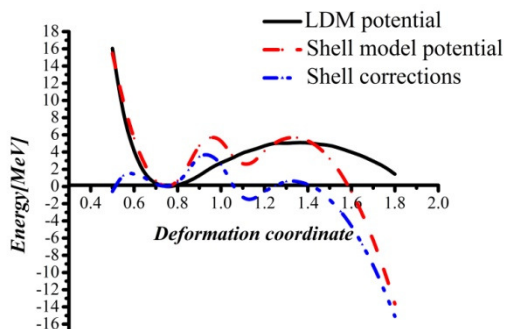
با مشخص شدن پتانسیل های تغییر شکل دو مدل، می توان تصحیحات پوسته ای مورد نیاز در مدل استاتیکی را فراهم آورد.



شکل ۴- نمودار سد شکافت دوکوهانه بر اساس مدل پوسته ای برای هسته  $^{238}\text{U}$

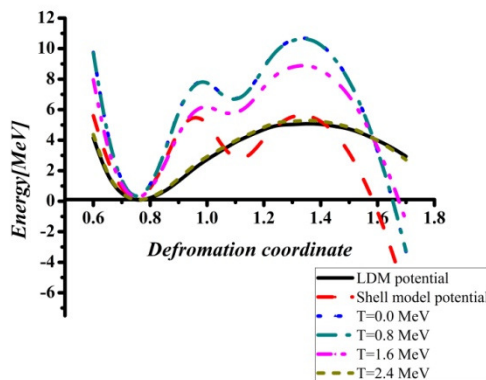
بدین صورت که با توجه به مدل ارائه شده توسط Strutinsky در مرجع [۶] و روش تکمیلی بیان شده در مراجع [۱۰ و ۱۱]، پتانسیل تغییر شکل کلی، به صورت مجموع پتانسیل های مدل قطره مایع در حال دوران و تصحیح پتانسیل پوسته ای نوشته می شود.

بنابراین اگر پتانسیل های تغییر شکل براساس مدل های پوسته ای و قطره مایع معین باشند، می-توان تصحیحات پوسته ای را از تفریق کردن این دو از یکدیگر بدست آورد. شکل (۵) نشان دهنده چنین تصحیحاتی برای هسته  $^{238}\text{U}$  به صورت تابعی از پارامتر تغییر شکل است.



شکل ۵- نمودار تصحیحات پوسته ای برای هسته  $^{238}\text{U}$

همچنین یک پارامتر تصحیح وابسته به دما در محاسبات پهنای شکافت مدل Strutinsky وجود دارد که اثرات دما را روی احتمال شکافت اعمال می کند [۲]. از طرفی طبق روابط ارائه شده در مرجع [۱۲]، می دانیم که تصحیحات پوسته ای، با افزایش دمای هسته ای، کاهش می یابند. نمودار چنین تغییراتی برای هسته  $^{238}\text{U}$  در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار تغییرات تصحیحات پوسته ای با توجه به تغییرات دمای هسته ای برای هسته  $^{238}\text{U}$

با توجه به شکل (۶)، کاملاً مشخص می باشد که با افزایش  $T$ ، تاثیرات پوسته ای کاهش یافته و سد پتانسیل با دوکوهان به سد پتانسیل تک کوهانه مدل قطره ای نزدیک می شود.

هنگامی که با عناصر سنگین سر و کار داریم، یک پارامتر بندی دیگر نیز برای تعیین سد پتانسیل شکافت وجود دارد که سد پتانسیل را براساس مدل قطره مایع و به صورت تابعی از پارامتر شکافت پذیری می دهد. این

پارامتربندی، از برازش سدهای پتانسیل تئوری و سدهای تجربی، توسط Dahlinger و همکارانش [۱۳] به دست آمده است، که برای تعیین ارتفاع سد در نقاط کلیدی کاربرد دارد. استفاده از این مدل، نتایج مشابه را ایجاد خواهد کرد.

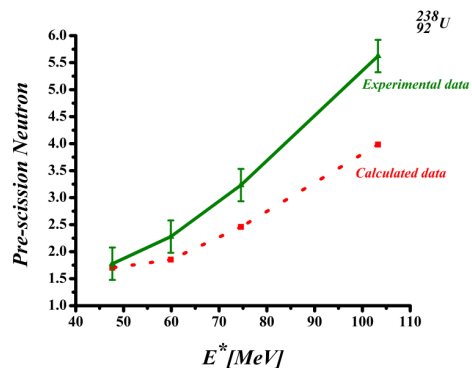
هنگامی که پهنای مختلف خروج نوترون،  $\Gamma_n$ ، گسیل گاما،  $\Gamma_\gamma$ ، و پهنای شکافت،  $\Gamma_f$ ، محاسبه شدند، پهنای کل،  $\Gamma_{tot}$ ، از جمع بندی روی پهنای سه گانه بدست می آید. قدم بعدی ما، تعیین احتمال رخداد هر یک از فرایندها در بازه زمانی  $\tau_{tot} = \hbar / \Gamma_{tot}$  می - باشد. برای این کار، ابتدا با استفاده از روش مونت کارلو، یک عدد تصادفی  $r$  بین صفر و یک انتخاب می کنیم. همچنین پارامتر  $s$  را به صورت  $\Gamma_i / \Gamma_{tot}$  تعریف می کنیم که در آن  $i$  یکی از فرایندهای خروج نوترون، گسیل گاما و شکافت است.

فرض می کنیم که در هر بار اجرای شبیه سازی، یک فرایند رخ دهد. در این صورت نسبت پهنای حتما عددی بین صفر و یک را اتخاذ می کند. هنگامی که عدد تصادفی  $r$  در یکی از این بازه ها واقع شود، آن احتمال، رخداد غالب را نشان می دهد. از این طریق، قانون واپاشی رادیواکتیو برای زنجیره واپاشی مختلف هسته مرکب، شبیه سازی می شود. بعد از هر فرایند، تعیین سطح جدید انرژی و اسپین هسته محصول، اهمیت ویژه ای دارد.

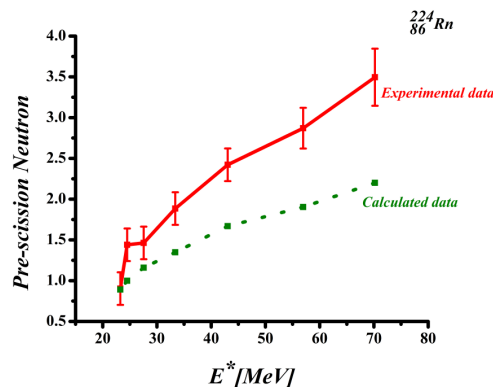
اگر فرایند انجام شده، گسیل گاما باشد، تنها کاهش در سطح انرژی هسته را داریم؛ در حالی که اگر خروج نوترون رخ دهد، هم انرژی برانگیختگی هسته تغییر می کند و هم اسپین و عددجرمی دست خوش تغییر می گردند. این فرایند ادامه می یابد تا شکافت رخ دهد. هنگامی که شکافت رخ دهد، می توان زمان شکافت را از جمع بستن زمان انجام فرایندهای مختلف تا پیش از شکافت، بدست آورد.

## نتایج:

اگر شبیه سازی را برای هسته های مرکب  $^{238}\text{U}$  و  $^{224}\text{Rn}$  اجرا کنیم و نوترون های خروجی طی فرایند را تحت نظر بگیریم، نمودار های حاصل بر حسب انرژی برانگیختگی به صورت شکل های (۷) و (۸) خواهند بود. داده های تجربی شکل های (۷) و (۸) از مرجع [۱۴] اتخاذ شده اند.



شکل ۷- نمودار تعداد نوترون خروجی تا پیش از شکافت بر حسب انرژی برانگیختگی هسته مرکب  $^{238}\text{U}$

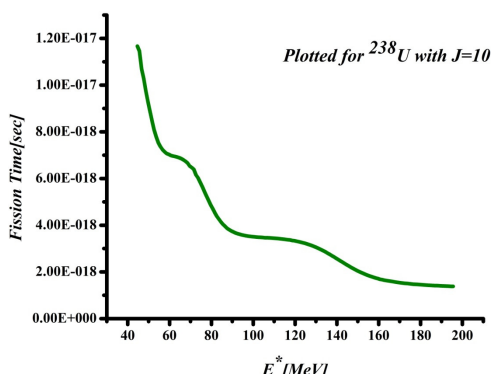


شکل ۸- نمودار تعداد نوترون خروجی تا پیش از شکافت بر حسب انرژی برانگیختگی هسته مرکب  $^{224}\text{Rn}$

از نمودارها کاملاً مشهود است که برآورد تعداد نوترون های خروجی، کمتر از اندازه گیری های تجربی می باشد. این امر می تواند به دلیل ثابت در نظر گرفتن چسبندگی ماده هسته ای، طی فرایند انتقال به نقطه زینی و سپس نقطه قطع باشد.

می توان نتیجه گرفت که برای تصحیح نتایج، باید چسبندگی ماده هسته ای که در محاسبات ما، ثابت فرض شده است را نیز وابسته به تغییر شکل، در نظر گرفت؛ به طوری که با افزایش کشیدگی، چسبندگی ماده هسته ای نیز افزایش یابد، تا زمان شکافت به گونه ای باشد که احتمال خروج نوترون های بیشتر را از هسته فراهم آورد.

در شبیه سازی تعیین زمان شکافت یک هسته، ما مدل سازی را برای هسته  $^{238}\text{U}$  انجام داده ایم. نتیجه محاسبات انجام شده در نمودار شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۹- نمودار زمان شکافت هسته  $^{238}\text{U}$  بر حسب انرژی برانگیختگی

نمودار رسم شده در شکل (۹)، با وجود منظور نشدن تغییرات مقدار چسبندگی هسته ای نسبت به تغییر شکل هسته، با مقادیر واقعی آزمایشگاهی، توافق مقبولی دارد که می تواند در محاسبات مختلف زمان شکافت هسته مرکب  $^{238}\text{U}$  مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع:

1. H. Bateman, *Proo. Cambridge Phil. Soc.* **16**, 423(1910).
2. B. Bouriquet, Y. Abe, and D. Boilley, *Computer Physics Communications* **159**, 1-18(2004).
3. D. Hilscher and H. Rossner, *Ann. Phys. Fr.* **17**, 471(1992).
4. Y. Abe, S. Ayek, P. G. Reinhard, and E. Suraud, *Phys. Rep.* **275**, 49(1996).
5. D. J. Hinde, R. J. Charity, G. S. Foote, J. R. Leigh, J. O. Newton, S. Ogaza, and A. Chattejee, *Nucl. Phys. A* **452**, 550-572(1986).
6. V. M. Strutinsky, *Nucl. Phys. A* **95**, 420(1967).
7. Zubov, Adamian, Antonenko, Ivanova, and Scheid, *Phys. Rev. C* **68**, 014616(2003).
8. K. H. Schmidt and W. Morawek, *Rep. Prog. Phys.* **54**, 949(1991).
9. B. S. Bhandari and Y. B. Bendaraf, *Phys. Rev. C* **45**, 2803(1992).
10. Dorin N. Poenaru and Ileana-Hania Plonski, *Romanian Rep. in Phys.* **60**, 529-538(2008).
11. S. Bjornholm and J. E. Lynn, *Reviews of Modern Physics* **52**, 4(1980).
12. G. Hansen and A. S. Jensen, *Nucl. Phys. A* **406**, 236(1983).
13. M. Dahlinger et al. , *Nucl. Phys. A* **376**, 94(1982).
14. D. J. Hinde et al. , *Phys. Rev. C* **39**, 2268(1989).