

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

129189



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش آزاد

اندازه‌گیری سطح مقطع تشکیل محصولات شکافت حاصل از واکنش شکافت  
القایی توریم  $^{232}\text{Tm}$  با نوترون‌های  $3\text{ MeV}$

استادان راهنما:

دکتر محمد رضا عبدی

دکتر هوشیار نوشاد

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

پژوهشگر:

نرگس کفائی

کتابخانه‌های مرکز علمی بزرگ  
گنجینه‌ی مرکز

اسفند ماه ۱۳۸۷

۱۲۹۸۵۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق  
موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه  
اصفهان است.

شوه نگارش پايان نامه  
رعايت شده است  
تصحيحات تکميلي دانشگاه اصفهان



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش آزاد

خانم نرگس کفائی

تحت عنوان

اندازه‌گیری سطح مقطع تشکیل محصولات شکافت حاصل از واکنش شکافت القایی

توریم ۲۳۲ با نوترون‌های ۳ MeV

در تاریخ ۸۷/۱۲/۲۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استادان راهنمای پایان نامه

امضا

دکتر محمد رضا عبدی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضا

دکتر هوشیار نوشاد با مرتبه‌ی علمی استادیار

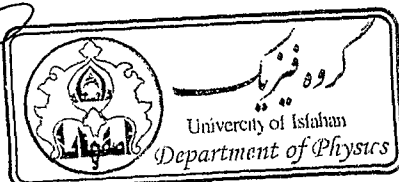
امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر مجتبی مستجاب الدعواتی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر مهدی نصری نصر آبادی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضای مدیر گروه



## سپاس و قدردانی از:

استاد فرهیخته و عالی‌قدر جناب آقای دکتر هوشیار نوشاد عضو محترم هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تهران به پاس هدایت مسئولانه این پروژه و برخورداری از راهنمایی و همراهی ارزنده و بی‌دریغشان. احساس مسئولیت و دلسوزی خارج از وصف ایشان ستودنی است. امیدوارم صمیمانه‌ترین احترامات قلبی اینجانب را بپذیرند و مجدداً افتخار شاگردی ایشان نصیبم شود. بدون شک برای همیشه قدردان بزرگواری‌هایشان خواهم بود. سلامتی و بهروزی ایشان را از ایزد منان خواهانم.

هم‌چنین از استاد ارجمند و بزرگوار جناب آقای دکتر محمد رضا عبدی که تجارب خویش را در اختیار بنده قرار دادند، تشکر می‌کنم و برای ایشان آرزوی سلامتی و توفیق در همهٔ امور دارم.

همین‌طور مراتب سپاس و تقدیر خود را از دوستان مهربانم خانم‌ها زهرا رضایی، مرجان جعفری، مرضیه چهارلنگ، سحر سلیمانی، نسیم ملکیان، فرزانه جورمهر، فاطمه وکیلی، الهام عسگری، مریم اکبری، زهره خسروی، مریم بردبار، خدیجه شعبانی، مریم مقیمی، بهناز رفیع زاده، آقایان محمد علی محمدی، سجاد محسنی‌پور، محسن موسوی، مصطفی منیری، علی داری، جعفر ساعی، بهنام علیزاده، مجتبی مکاری و رضا سیاوشی اعلام می‌دارم. برای همهٔ این عزیزان آرزوی نیک بختی و موفقیت در کلیهٔ امور زندگی به‌ویژه در عرصهٔ پهناور علم می‌نمایم.

تقدیم به پدرم که اسوۀ استقلال است. اگر ایستاده‌ام اوقامتم بوده و اگر گامی بر می‌دارم او استوارم نموده.

مادرم اولین ثمرۀ کوچک دستانم ارزانی شما و بردباری‌تان.

## چکیده

مطالعه شکافت هسته‌ای جهت تامین انرژی و تحقیق پیرامون ساختار هسته‌ای اکتینیدها ( $103 < Z < 89$ ) و پیش‌اکتینیدها از زمان کشف پدیده شکافت (۱۹۳۹) تاکنون همواره مورد توجه فیزیکدانان هسته‌ای بوده است. با این وجود، هنوز معمای توزیع جرم پاره‌های شکافت حل نشده است.

اندازه‌گیری کمیت‌هایی مانند سطح مقطع تشکیل محصولات شکافت نیز اهمیت زیادی به‌ویژه در سیستم‌های مبتنی بر شتاب‌دهنده دارد. همچنین می‌توان توزیع جرم پاره‌های شکافت، توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار و سطح مقطع کل شکافت را نیز به‌دست آورد و درباره مقارن یا نامتقارن بودن این توزیع‌ها و اثرات پوسته‌ای در هسته‌های شکافته بحث نمود.

در این پایان نامه شکافت توریم  $^{232}\text{Th}$  با نوترون‌های سریع بررسی شده است. این ایزوتوپ با نوترون‌های کم‌تر از  $1/2 \text{ MeV}$  شکافته نمی‌شود، در حالی که می‌تواند با جذب یک نوترون واکنش شکافت انجام شود. بنابراین  $^{232}\text{Th}$  جایگزین مناسبی برای  $^{238}\text{U}$  در راکتورهای سریع به شمار می‌آید. مطالعه شکافت توریم  $^{232}\text{Th}$  با نوترون‌های سریع از نقطه نظر فیزیک ساختار هسته اهمیت بسیاری دارد. اولاً توزیع جرم پاره‌های شکافت حاصل از هسته شکافته  $^{232}\text{Th}^*$  دارای قله کوچکی است که نماینده شکافت متقارن است. به عبارت دیگر هر چند که در هسته مرکب  $^{232}\text{Th}^*$ ، با این انرژی برانگیختگی، شکافت نامتقارن مد غالب است، ولی سهم شکافت متقارن نیز در این واکنش قابل اغماض نخواهد بود. ثانیاً نسبت تعداد نوترون به پروتون برای این هسته مرکب از بسیاری از هسته‌های شکافته دیگر بزرگ‌تر است.

**کلید واژه:** شکافت، سطح مقطع، نوترون، پاره شکافت، توریم

فصل اول: شکافت هسته‌ای

۱-۱-۱- مقدمه .....	۱
۱-۱-۱- شکافت خود به خودی .....	۲
۲-۱-۱- شکافت القایی ذره باردار .....	۲
۲-۱- اساس فیزیکی فرآیند شکافت .....	۳
۳-۱- مدل‌های شکافت هسته‌ای .....	۷
۱-۳-۱- مدل قطره مایع .....	۷
۲-۳-۱- نواقص مدل قطره مایع .....	۱۴
۳-۳-۱- مدل آماری شکافت هسته‌ای .....	۱۴
۴-۳-۱- مدل ذره مستقل .....	۱۸
۵-۳-۱- مدل استروتنینسکی .....	۱۹
۴-۱- ارتفاع سد شکافت .....	۲۰
۱-۴-۱- محاسبه تجربی ارتفاع سد شکافت .....	۲۰
۲-۴-۱- محاسبه تئوری ارتفاع سد شکافت .....	۲۱
۵-۱- سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای .....	۲۵
۶-۱- توزیع جرم و انرژی جنبشی کل پاره‌های شکافت .....	۲۷

فصل دوم: اکتینیدها

۱-۲- مقدمه .....	۳۰
۲-۲- روش‌های فرو پاشی اکتینیدها .....	۳۱
۳-۲- توریم .....	۳۲
۱-۳-۲- محاسبه اکتیویته ویژه توریم موجود در توری چراغ‌های گازی .....	۳۳
۲-۳-۲- شبیه‌سازی آزمایش .....	۳۵

فصل سوم: گداخت هسته‌ای

۱-۳- مقدمه .....	۳۹
۲-۳- برهم‌کنش‌های نوترون با ماده .....	۴۲
۳-۳- مولد نوترون .....	۴۳
۴-۳- روش اندازه‌گیری شار نوترون .....	۴۵



## فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری

۴۸.....	۱-۴- امکان پذیری واکنش شکافت توریم.....
۴۸.....	۱-۱-۴- بررسی نظری واکنش.....
۵۱.....	۲-۱-۴- شکل هسته شکافنده $^{233}\text{Th}^*$ در نقطه زین.....
۵۳.....	۲-۴- سطح مقطع واکنش شکافت.....
۵۶.....	۳-۴- توزیع جرم محصولات شکافت.....
۵۷.....	۴-۴- توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت.....
۶۲.....	۵-۴- قطبش بار الکتریکی محصولات شکافت.....
۶۵.....	منابع و ماخذ.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱. انرژی پتانسیل هسته شکافنده به صورت تابعی از تغییر شکل هسته (مطابق مدل قطره مایع).....	۳
شکل ۱-۲. مکانسیم شکافت هسته سنگین.....	۵
شکل ۱-۳. نقشه پر بند انرژی پتانسیل بر حسب ضرایب $\alpha_p$ و $\alpha_n$ .....	۱۱
شکل ۱-۴. طبقه‌بندی سطح مقطع‌های میکروسکوپی.....	۲۷
شکل ۱-۲. کارایی آشکارساز بر حسب انرژی برای یک چشمه نقطه‌ای.....	۳۴
شکل ۲-۲. نتیجه شبیه‌سازی مونت کارلو برای زاویه فضایی قرص با ضخامت $1/3$ cm و قطر $4/7$ cm و آشکارساز با قطر $5/9$ cm بر حسب فاصله سطح جلویی قرص از آشکارساز. قرص و آشکارساز هم محور و موازی هستند.....	۳۷
شکل ۱-۳. نمودار آهنگ برخورد بر حسب دما.....	۴۲
شکل ۲-۳. طرح کلی یک مولد نوترون.....	۴۳
شکل ۳-۳. طرح اساسی یک شتابدهنده جدید مولد نوترون.....	۴۴
شکل ۳-۴. طرز قرار گرفتن هدف در مقابل شار نوترون.....	۴۶
شکل ۱-۴. شکل هسته مرکب شکافنده $^{233}\text{Th}^*$ در نقطه زین (مطابق مدل قطره مایع).....	۵۲
شکل ۲-۴. شکل هسته مرکب شکافنده $^{198}\text{Hg}^*$ در نقطه زین (مطابق مدل قطره مایع).....	۵۲
شکل ۳-۴. شکل هسته مرکب شکافنده $^{239}\text{U}^*$ در نقطه زین (مطابق مدل قطره مایع).....	۵۲
شکل ۴-۴. سطح مقطع واکنش شکافت القایی توریم $^{232}$ بر حسب انرژی نوترون با استفاده از کد محاسباتی MCNP.....	۵۵
شکل ۴-۵. سطح مقطع واکنش شکافت القایی توریم $^{232}$ بر حسب انرژی نوترون.....	۵۵
شکل ۴-۶. منحنی توزیع جرم در واکنش شکافت القایی توریم $^{232}$ با نوترون‌های $14/8$ MeV.....	۵۷
شکل ۴-۷. توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار در واکنش شکافت القایی اورانیوم $^{238}$ با پروتون.....	۶۰
شکل ۴-۸. توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار در واکنش شکافت القایی اورانیوم $^{238}$ با پروتون.....	۶۰
شکل ۴-۹. محتمل‌ترین بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار بر حسب انرژی برانگیختگی هسته مرکب در واکنش شکافت اورانیوم $^{238}$ با پروتون.....	۶۱
شکل ۴-۱۰. قطبش بار الکتریکی در واکنش شکافت اورانیوم $^{238}$ با پروتونهای $65$ MeV.....	۶۳

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲. تعدادی از دختر- هسته‌های توریم به همراه انرژی فوتوالکتریک، نسبت شاخه‌ای و فعالیت آن‌ها.....	۳۷
جدول ۱-۴ سطح مقطع واکنش شکافت القایی توریم ۲۳۲ با نوترون‌های سریع.....	۵۶

## فصل اول

### شکافت هسته‌ای

#### ۱-۱- مقدمه

فرآیند شکافت هسته‌ای، پدیده‌ای بسیار جالب و پیچیده است. کشف این پدیده در سال ۱۹۳۸ توسط هان و استراسمن به وسیله آزمایش‌های پرتو شیمیایی در یچه‌ای نو به سوی انجام تحقیقاتی جدید بود که نتایج حاصل از آن‌ها ارزش و اهمیت این کشف را دو چندان می‌نمود. در فرآیند شکافت، هسته شکافت‌پذیر به دو یا چند هسته کوچک‌تر تبدیل می‌شود که این پدیده با آزاد شدن مقدار زیادی انرژی و گسیل تعدادی نوترون همراه است. با این که از کشف این پدیده زمان زیادی می‌گذرد و با توجه به تحقیقات تئوری و تجربی انجام شده، مطالعات برای ارائه نظریه‌ای جامع و کامل که بتواند جنبه‌های مختلف شکافت هسته‌ای را توجیح کند، ادامه دارد. انرژی هسته‌ای تولید شده در فرآیند شکافت و نوترون‌های زیادی که در طول این فرآیند آزاد می‌شود، اهمیت این مطالعات را بیش‌تر می‌کند. واکنش‌های زنجیره‌ای شکافت گاهی به سرعت وبدون کنترل مانند شکافت انفجاری و بمب‌های هسته‌ای و گاهی تحت کنترل در راکتورهای شکافت روی می‌دهد. فرآیند شکافت هسته‌ای به دو طریق انجام می‌شود: شکافت خود به خودی و شکافت القا.

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد بیش تر هسته‌ها در برابر شکافت خود به خودی پایدار هستند و نیمه عمر شکافت خود به خودی هسته‌های سنگین مثل  $^{238}\text{U}$  در حدود  $10^{16}$  سال است. بنابراین شکافت در اغلب این عناصر به روش القایی مطرح است. در این حالت انرژی لازم برای شکافت هسته با تابش پرتابه‌ای با انرژی مشخص تامین می‌شود.

### ۱-۱-۱- شکافت خود به خودی

شکافت خود به خودی SF فرآیندی در زمرهٔ فروپاشی رادیواکتیو است که در آن تقسیم یک هسته بدون القا واکنش شکافت انجام می‌پذیرد. در حقیقت برای بسیاری از ایزوتوپ‌های اکتینیدها فرآیند SF با فروپاشی  $\alpha$  رقابت می‌نماید. لذا، سرعت‌های واکنش بر اساس  $\lambda$  محاسبه می‌شود که در آن  $\lambda$  ثابت فروپاشی برای SF می‌باشد.

SF را می‌توان یک فرآیند فروپاشی به صورتی در نظر گرفت که در آن یک هسته از حالت پایه از طریق سدهای شکافت تونل می‌زند. چنانچه یک هسته بین دو سد به دام افتاده باشد، با تونل زنی سد دوم شکافت شده، که در این صورت شکافت ایزومری، IF، نامیده می‌شود. از طرف دیگر چنانچه همان هسته به سد اول نفوذ نموده به حالت پایه برسد، در این صورت واکنجستگی  $\gamma$  نامیده خواهد شد. برای ایزوتوپ‌های عناصر با  $Z=92-94$  هر دو سد دارای ارتفاع قابل مقایسه بوده، هسته‌های به دام افتاده در این دره دارای عمرهای محدودی خواهند بود. وجود این حالات ایزومری به دلیل تغییر شکل بوده و در این صورت ایزومری شکل هستند. SF یک فرآیند فروپاشی از حالت پایه بوده و IF تنها در واکنش‌های القایی مشاهده می‌شود [۱].

### ۱-۲-۱- شکافت القایی ذرهٔ باردار

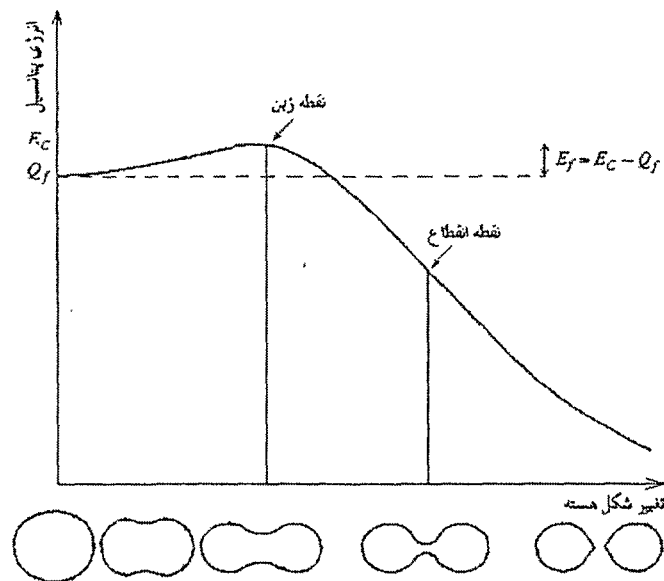
شکافت هسته‌ها با القا ذرات باردار هم‌چون  $p$  و  $\alpha$  قابل انجام است. بر عکس حالت نوترون‌ها، واکنش‌های القایی ذرهٔ باردار دارای سد کولنی  $V_c$  است. مثلاً شکافت القایی پروتون  $^{232}\text{Th}$  دارای یک  $V_c$  اطراف  $11\text{ MeV}$  بوده و تا زمانی که انرژی بیش تری تأمین نگردد، شکافت انجام نمی‌پذیرد. در حالت شکافت القایی ذرهٔ آلفای  $^{232}\text{Th}$ ،  $V_c$  در حدود  $22\text{ MeV}$  است. هستهٔ مرکب،  $^{236}\text{U}$  می‌باشد. برای انجام واکنش شکافت انرژی ذرهٔ  $\alpha$  باید بزرگ‌تر یا مساوی با  $22 \times 236 / 232\text{ MeV}$  باشد. این فرآیند منجر به انرژی برانگیختگی بالای هستهٔ مرکب  $^{236}\text{U}$  خواهد شد. هنگامی که انرژی برانگیختگی بیش تر از انرژی لازم برای گسیل ذره باشد، ذرات هم چون  $n$ ،  $p$  و  $\alpha$  قبل از شکافت گسیل می‌شوند. در حالت شکافت القایی آلفای با انرژی  $30\text{ MeV}$  برای  $^{232}\text{Th}$ ،  $E^*$  برابر  $24/92\text{ MeV}$  است.  $^{236}\text{U}^*$

می‌تواند شکافته شده و یا نوترونی را گسیل نماید که در این صورت  $^{235}\text{U}$  با انرژی برانگیختگی در حدود  $17\text{ MeV}$  باقی می‌ماند که می‌تواند شکافته شود. این شکافت به نام شانس دوم شکافت می‌باشد.  $^{235}\text{U}$  هم‌چنین می‌تواند نوترونی را گسیل نموده که در نتیجه هسته  $^{234}\text{U}$  با انرژی برانگیختگی در حدود  $9\text{ MeV}$  باقی می‌ماند. چنان‌چه  $^{234}\text{U}$  شکافته شود، به نام شانس سوم شکافت خواهد بود. مواردی هم‌چون توزیع جرم، توزیع انرژی جنبشی، گسیل نوترون و گسیل  $\gamma$  شباهت زیادی در هر دو حالت شکافت القایی نوترون و SF دارند [۱].

### ۱-۲- اساس فیزیکی فرآیند شکافت

اگر هسته یک عنصر سنگین را در نظر بگیریم، آن‌گاه انرژی پتانسیل آن به صورت تابعی از تغییر شکل هسته مانند شکل (۱-۱) خواهد بود [۲]. در این شکل  $E_c$  انرژی کولنی و  $Q_f$  انرژی آزاد شده از شکافت هسته است. تفاضل این دو مقدار، انرژی سد شکافت  $E_f$  نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$E_f = E_c - Q_f \quad (1-1)$$

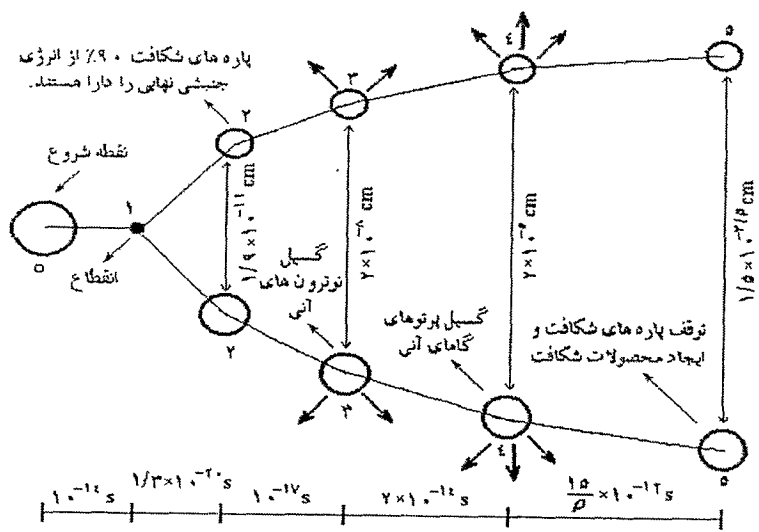


شکل ۱-۱. انرژی پتانسیل هسته شکافته به صورت تابعی از تغییر شکل هسته (مطابق مدل قطره مایع)

برای ایجاد شکافت در یک هسته سنگین باید به طریقی بر سد شکافت فائق آمد. این عمل توسط پرتابه با انرژی مشخص انجام می‌شود. به این ترتیب اگر بتوان برسد شکافت غلبه نمود، آن‌گاه هسته از حالت تعادل خارج می‌شود و شروع به نوسان می‌کند. تغییر شکل هسته در نقطه زین منحنی به اوج خود می‌رسد. نقطه زین باریک‌ترین

قسمت هسته است که انرژی برانگیختگی در این نقطه، احتمال گذار هسته را از حالت اولیه (هسته مرکب) به حالت نهایی (پاره‌های شکافت) تعیین می‌کند. در این نقطه انرژی لازم برای شکافتن هسته به دو پاره شکافت کم‌ترین مقدار را دارد. نقطه زین دیگری نیز می‌توان در نظر گرفت که انرژی لازم برای شکافتن هسته به سه پاره شکافت، کم‌ترین مقدار را داشته باشد. اصولاً تقسیم هسته به دو پاره شکافت خیلی محتمل‌تر از تقسیم هسته به سه پاره است، اگر چه در شکافت سه تایی انرژی بیش‌تری آزاد می‌شود.

طبق مدل قطره مایع، انرژی سطحی تمایل دارد هسته را به حالت اولیه برگرداند، در حالی که انرژی کولنی سعی دارد باعث تقسیم شدن هسته شود. اگر انرژی کولنی بر انرژی سطحی غلبه کند، آن‌گاه زمانی فرا خواهد رسید که هسته به دو پاره شکافت تقسیم شود. این پدیده را انقطاع می‌نامند و نقطه ای که در آن، عمل تقسیم هسته انجام می‌شود نقطه انقطاع نام دارد. در این نقطه دو پاره شکافت شدیداً دچار تغییر شکل شده‌اند و در حالت برانگیخته قرار دارند. تقریباً تمام انرژی حاصل از شکافت به صورت انرژی کولنی بین دو پاره شکافت ظاهر می‌شود. در شکل (۲-۱) حالت اولیه هسته شکافته و موقعیت پاره‌های شکافت ایجاد شده در زمان‌های مربوطه نشان داده شده است [۲]. لحظه صفر، حالت اولیه هسته را نشان می‌دهد و وضعیت ۱ نمایانگر نقطه انقطاع است. چنان‌چه ملاحظه می‌شود، از حالت اولیه هسته تا نقطه انقطاع فقط  $10^{-14}$  ثانیه طول می‌کشد. سپس پاره‌های شکافت حاصل، در فاصله زمانی بسیار کوتاه  $10^{-20}$  تا  $10^{-22}$  ثانیه به اندازه  $10^{-11}$  تا  $10^{-9}$  سانتی‌متر از یکدیگر دور می‌شوند و در این زمان ۱۰٪ انرژی خود را از دست می‌دهند. پاره‌های شکافت پس از  $10^{-17}$  ثانیه در فاصله  $10^{-8}$  تا  $10^{-5}$  سانتی‌متر از یکدیگر قرار می‌گیرند. در این مرحله پاره‌های شکافت نوترون‌های آبی گسیل می‌کنند. پس از گذشت  $10^{-14}$  ثانیه، فاصله پاره‌های شکافت از یکدیگر  $10^{-5}$  تا  $10^{-2}$  سانتی‌متر می‌شود. در این مرحله پرتوهای گامای آبی گسیل می‌گردد. سپس پاره‌های شکافت متوقف می‌شوند. در این مرحله، پاره‌های شکافت متوقف شده را محصولات شکافت می‌نامند. این‌ها حتی اگر در حالت پایه قرار داشته باشند نیز عموماً از خط پایداری بتا دور هستند. بنابراین با واپاشی بتا که متعاقب تابش گاما یا گسیل نوترون انجام می‌شود، به هسته‌های پایدار استحاله می‌یابند. این فرآیندها را فرآیندهای تأخیری می‌نامند.



شکل ۱-۲. مکانسیم شکافت هسته سنگین

می توان فرآیند شکافت هسته ای را به چهار مرحله تقسیم بندی نمود [۳]:

- ۱- تشکیل حالت اولیه (هسته مرکب)
  - ۲- از تشکیل حالت اولیه تا انقطاع
  - ۳- از انقطاع تا تشکیل محصولات شکافت، با فرآیندهای آبی
  - ۴- واانگیختگی محصولات شکافت، با فرآیندهای تأخیری
- در زیر مختصری درباره این مرحله ها آورده شده است.

۱. تشکیل حالت اولیه. هسته ای که شکافته می شود را با  $X^*$  نمایش می دهیم. در فرآیند شکافت ابتدا یک هسته مرکب به وجود می آید، که همان حالت اولیه است. در شکافت القایی هسته  ${}^A_Z X$  با نوترون خواهیم داشت:

$${}^A_Z X + n \rightarrow {}^{A+1}_Z X^* \tag{۲-۱}$$

برای هسته های شکافت پذیر، عدد جرمی  $A$  نسبتاً زیاد است. بنابراین انرژی پس زنی هسته مرکب کم خواهد بود و انرژی برانگیختگی آن را می توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{ext} = Q + E_n \tag{۳-۱}$$



۲. از تشکیل حالت اولیه تا انقطاع. بررسی هسته شکافنده از حالت اولیه تا انقطاع، با استاتیک فرآیند شکافت و

دینامیک آن تعیین می‌شود. این مرحله برای تعیین احتمال شکافت نقش مهمی را ایفا می‌کند.

- استاتیک فرآیند شکافت. با تعیین انرژی پتانسیل هسته به صورت تابعی از ضرایب تغییر شکل، می‌توان استاتیک

فرآیند شکافت را بررسی نمود. تغییر شکل هسته به وسیله مجموعه‌ای از ضرایب تغییر شکل تعریف می‌شود. برای توصیف کامل فرآیند شکافت در مراحل مختلف، پارامترهای زیادی لازم است. به عنوان مثال، شکل هسته‌های با تغییر شکل جزئی را می‌توان به طور تقریب با هارمونیک‌های کروی نمایش داد. برای تغییر شکل‌های پیچیده و بزرگ باید از روابط ریاضی دیگری استفاده نمود.

انرژی پتانسیل هسته تغییر شکل یافته را با  $V$  نمایش می‌دهند. محاسبه  $V$  به ویژه در تغییر شکل‌های بزرگ کار دشواری است ولی برای سادگی می‌توان آن را فقط بر حسب یکی از پارامترهای تغییر شکل، مانند کشیدگی رسم نمود، این منحنی، سد شکافت یک بعدی نامیده می‌شود. بررسی سد شکافت هسته‌های شکافنده بسیار مهم است و برای مطالعه احتمال شکافت هسته‌ها به کار می‌رود.

- دینامیک فرآیند شکافت. در هسته‌های سنگین، نقطه زین به نقطه انقطاع نزدیک نیست و برای شکافت هسته

باید دینامیک شکافت را از نقطه زین تا نقطه انقطاع در نظر بگیریم. در این زمینه محاسبات گسترده‌ای انجام شده است [۴]. در حقیقت، از نقطه نظر اینرسی و چسبندگی، دینامیک فرآیند شکافت نقش مهمی را در مکانیسم شکافت ایفا می‌کند. اثرات چسبندگی از جفت شدگی درجات آزادی جمعی با درجات آزادی ذاتی ناشی می‌شوند. به طور کلی می‌توان گفت که چسبندگی نقش مهمی را در سرعت رسیدن هسته از نقطه زین تا نقطه انقطاع به عهده دارد. چسبندگی ماده هسته‌ای، به پارامترهای زیادی از جمله، انرژی برانگیختگی هسته بستگی دارد. از این رو در حال حاضر به خوبی شناخته نشده است و با وجود پیچیدگی‌های زیاد، نه تنها در شکافت هسته‌ای، بلکه در مطالعه فیزیک یون‌های سنگین نیز از آن استفاده می‌شود.

۳. از انقطاع تا تشکیل محصولات شکافت با فرآیندهای آنی. بعد از نقطه انقطاع، بین دو پاره شکافت هیچ نیروی

هسته‌ای وجود ندارد و نیروی دافعه کولنی آن‌ها را از یکدیگر دفع می‌کند. در این مرحله، پاره‌های شکافت به سرعت به شکل کروی و حالت پایه‌شان می‌رسند و متعاقب آن، انرژی تغییر شکل آزاد می‌شود که به انرژی برانگیختگی در نقطه انقطاع اضافه می‌گردد. چنانچه در پاره‌های شکافت این انرژی برانگیختگی از انرژی جدایی نوترون بزرگ‌تر باشد، آن گاه با گسیل یک یا چند نوترون به یک حالت برانگیخته و پایین‌تر از آستانه گسیل نوترون، واانگیخته می‌شوند. این نوترون‌ها را نوترون‌های آنی می‌نامند. بعد از گسیل نوترون‌های آنی، پاره‌های شکافت فقط می‌توانند با گسیل پرتوهای گاما واانگیخته شوند. چون برهم کنش‌های الکترومغناطیسی قوی بین نوکلئون‌ها است،

بنابراین آهنک واپاشی گاما آهسته‌تر از گسیل نوترون است. پس از گسیل پرتوهای گامای آنی، پاره‌های شکافت، در حالت پایه و یا در یک ایزومری با عمر بلند قرار خواهند گرفت.

۴. واانگیختگی محصولات شکافت با فرآیندهای تاخیری. هنگامی که پاره‌های شکافت اولیه در نقطه انقطاع به وجود آمدند، از خط پایداری بتا دور هستند، گسیل نوترون‌های آنی، پاره‌های شکافت را به این خط نزدیک‌تر می‌کند. اما علی‌رغم گسیل این نوترون‌ها، معمولاً محصولات شکافت هسته پایدار نیستند. زیرا هنوز می‌توانند با گسیل بتا واانگیخته شوند. از این رو با گسیل بتا، به هسته‌های پایدار استحال می‌یابند. واپاشی بتا نتیجه یک برهم‌کنش ضعیف است، بنابراین آهنک واپاشی آن بسیار آهسته‌تر از فرآیندهای آنی است. در واپاشی بتا، معمولاً هسته‌های دختر در حالت برانگیخته هستند. پس با گسیل پرتوهای گاما و نوترون به حالت پایه می‌رسند. این قبیل نوترون‌ها و پرتوهای گاما را تأخیری می‌نامند.

### ۱-۳-۳- مدل‌های شکافت هسته‌ای

با در نظر گرفتن هامیلتونی هسته به شکل:

$$H = \sum_{i=1}^A \frac{P_i^2}{2M} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^A V_{ij} + E.M \quad (4-1)$$

که در آن  $P_i$  تکانه ذره  $i$  ام،  $V_{ij}$  پتانسیل برهم‌کنش بین دو ذره  $i$ ،  $j$  و  $E.M$  جمله مربوطه به اثر میدان مغناطیسی است، می‌توانیم شکافت هسته را مورد بررسی قرار دهیم. اما استفاده از این هامیلتونی دقیق برای بررسی هسته کار دشواری است و هم‌چنین اطلاعات کافی در مورد نیروی بین نوکلئون‌ها و شکل آن‌ها در دسترس نیست، بنابراین باید از مدل‌هایی که با وجود سادگی، قادر به توصیف رفتارهای هسته‌ای هستند استفاده کنیم.

#### ۱-۳-۱- مدل قطره مایع

در این مدل دو فرض اساسی در نظر گرفته می‌شود:

۱- هسته تراکم ناپذیر است، پس حجم آن در شکافت تغییر نمی‌کند و چگالی هسته‌ای میانگین  $\rho$  برای پاره‌های شکافت و هسته شکافت پذیر یکسان است.

۲- هر چند نیروهای نوکلئونی پیچیدگی زیادی دارند اما برد  $(r_{ii})$  آن‌ها در مقایسه با شعاع هسته‌ای  $(R)$ ، برای هسته‌های سنگین کوچک‌تر است و نیروهای هسته‌ای دارای خاصیت اشباع هستند. بنابراین بخش هسته‌ای انرژی

پتانسیل می تواند به عنوان مجموع یک عبارت حجمی متناسب با  $A$  و مستقل از شکل هسته و عبارت سطحی متناسب با  $A \left( \frac{r_n}{R} \right)$  وابسته به شکل هسته در نظر گرفته شود. در مدل قطره مایع انرژی بستگی کل یک هسته با عبارت زیر بیان می شود:

$$B_{tot}(A, Z) = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \delta + \eta \quad (5-1)$$

جمله اول و چهارم در معادله بالا وابسته به حجم هسته و در نتیجه مستقل از تغییر شکل هسته است. اما جمله دوم بیان کننده کاهش سهم نوکلئونهای سطحی در انرژی بستگی است و با افزایش مساحت سطح هسته در اثر تغییر شکل، افزایش می یابد. جمله سوم سهم انرژی کولنی است و در تغییر شکل هسته به دلیل افزایش فاصله میانگین بین پروتون ها کاهش می یابد. بنابراین در تعیین پتانسیل هسته تغییر شکل یافته، عبارت مربوط به انرژی سطحی و انرژی کولنی وابسته به تغییر شکل هسته باید در نظر گرفته شود.

هامیلتونی مدل قطره مایع را می توان به شکل  $H = V(\alpha) + T(\alpha')$  در نظر گرفت که  $V(\alpha)$  و  $T(\alpha')$  به ترتیب انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی قطره مایع است که به شکل تابعی از ضرایب تغییر شکل  $\alpha$  نوشته شده است. اگر هسته را ماده ای تراکم ناپذیر فرض کنیم، نوسانات هسته برانگیخته باعث تغییر در سطح آن خواهد شد و حجم ثابت می ماند. انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی هسته تغییر شکل داده را می توان با بسط حول انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی یک هسته کروی با استفاده از سری توانی لژاندر محاسبه کرد. برای تغییر شکل های کوچک از نوع  $P_r(\cos\theta)$  معادله شعاعی هسته کروی تغییر شکل یافته به صورت زیر خواهد بود:

$$R(\theta) = R_0 [1 + \alpha_r P_r(\cos\theta)] \quad (6-1)$$

که در آن  $R_0 = \frac{1}{3} A^{\frac{1}{3}}$ ، شعاع کره تغییر شکل نیافته (هسته کروی) و  $\alpha_r$  ضریب ثابت تغییر شکل و  $P_r$  چند جمله ای لژاندر مرتبه دو است. انرژی سطحی یک قطره کروی،  $E_s^{(1)}$ ، برابر است با:

$$E_s^{(1)} = 4\pi R_0^2 \tau \text{ MeV} \quad (7-1)$$

که  $\tau$  و  $R_0$  به ترتیب کشش سطحی و شعاع هسته کروی هستند. مقدار  $\tau$  با استفاده از فرمول نیمه تجربی جرم MeV  $0.958$  به دست می آید. بنابراین خواهیم داشت:

$$E_s^{(i)} = 17/8 A^{\frac{1}{2}} \text{ MeV} \quad (8-1)$$

مطابق روش بوهر و ویلر انرژی سطحی قطره تغییر شکل یافته به صورت زیر به دست می آید:

$$E_s = E_s^{(i)} \left[ 1 + \frac{2}{5} \alpha_r^2 + \frac{5}{7} \alpha_r^4 + \dots \right] \text{ MeV} \quad (9-1)$$

انرژی کولنی یک قطره کروی در الکترواستاتیک برابر است با:

$$E_c^{(i)} = \frac{3}{5} \frac{(Ze)^2}{R} = \frac{0.7103 Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \text{ MeV} \quad (10-1)$$

و انرژی کولنی هسته تغییر شکل یافته به صورت زیر به دست می آید:

$$E_c = E_c^{(i)} \left[ 1 - \frac{1}{5} \alpha_r^2 - \frac{10}{49} \alpha_r^4 + \dots \right] \text{ MeV} \quad (11-1)$$

در نتیجه تغییرات انرژی پتانسیل در اثر تغییر شکل  $\Delta V$  برابر خواهد بود با:

$$\Delta V (V - V(\cdot)) = (E_s + E_c) - (E_s^{(i)} + E_c^{(i)}) = \frac{1}{5} \alpha_r^2 (2E_s^{(i)} - E_c^{(i)}) + \dots \quad (12-1)$$

برای تغییر شکل های کوچک می توان از ضرایب  $\alpha_r$  صرف نظر کرد:

$$\Delta V = \frac{1}{5} \alpha_r^2 (2E_s^{(i)} - E_c^{(i)}) \quad (13-1)$$

$\Delta V$  تعیین کننده پایداری یک هسته در برابر فرآیند شکافت خود به خودی است به طوری که:

$$\Delta V > 0 \rightarrow E_c^{(i)} < 2E_s^{(i)} \quad \text{هسته در مقابل شکافت پایدار است}$$

$$\Delta V < 0 \rightarrow E_c^{(i)} > 2E_s^{(i)} \quad \text{هسته در مقابل شکافت ناپایدار است}$$