

## فهرست مطالب

۱۱	فصل اول	۱
۱۲	مقدمه	۱.۱
۱۴	شکافت و واپاشی آلفایی	۲.۱
۱۴	ارتباط واپاشی آلفایی با ساختار هسته	۳.۱
۱۵	شکافت هسته	۴.۱
۱۷	شکافت سه گانه	۵.۱
۱۹	آشکارسازی ذره آلفا در شکافت خودبخود هسته $^{252}\text{Cf}$	۶.۱
۲۰	سازوکار شکافت از دیدگاه مدل قطره مایع	۷.۱
۲۱	مدل قطره مایع از دیدگاه ایستایی (استاتیکی)	۸.۱
۲۵	مدل قطره مایع از دیدگاه دینامیکی	۲.۸.۱
۲۵	سازوکار شکافت از دیدگاه مدل جمعی	۹.۱
۲۵	مدل جمعی در ناحیه هسته های تغییر شکل یافته	۱۰.۱
۲۷	شکافت هسته و مدل جمعی	۱۱.۱
۲۷	نقش ویژه نقطه زینی	۱.۱۱.۱
۲۸	نیمه عمر شکافت خودبخود	۲.۱۱.۱
۲۸	جرم محصول	۳.۱۱.۱
۲۸	نیاز به مدل های دیگر	۱۲.۱
۲۹	مختصات جمعی	۱۳.۱
۳۱	مدل نیلسون <i>Nillson</i>	۱۴.۱
۳۳	فصل دوم	۲
۳۴	مقدمه	۱.۲
۳۶	مدل قطره مایع	۲.۲
۳۷	انرژی قیدی	۳.۲
۳۷	اندازگیری های جرم	۴.۲
۴۱	فرمول جرم	۵.۲

..... ۴۱	..... جمله حجمی	..... ۶.۲
..... ۴۲	..... انرژی تقارنی	..... ۷.۲
..... ۴۴	..... انرژی سطحی	..... ۸.۲
..... ۴۶	..... انرژی کولنی	..... ۹.۲
..... ۴۷	..... پتانسیل یوکاوا۱ چین خورده ( <i>FOLDED YUKAWA POTENTIAL</i> )	..... ۱۰.۲
..... ۴۹	..... پتانسیل یوکاوا۱ چین خورده+ نمایی ( <i>YUKAWA-PLUS-FOLDED EXPONENTIAL POTENTIAL</i> )	..... ۱۱.۲
..... ۵۰	..... ناتقارنی چگالی بار الکتریکی و انرژی های ماکروسکوپی وابسته به تغییر شکل	..... ۱۲.۲
..... ۵۲	..... سیستم های دوگانه با ناتقارنی چگالی بار	..... ۱۳.۲
..... ۵۲	..... انرژی کولنی	..... ۱.۱۳.۲
..... ۵۴	..... انرژی سطحی	..... ۲.۱۳.۲
..... ۵۴	..... مدل برد محدود نیروهای هسته ای <i>FRNFM</i>	..... ۳.۱۳.۲
..... ۵۵	..... مدل یوکاوا۱+ نمایی	..... ۴.۱۳.۲
..... ۵۶	..... انرژی حجمی	..... ۵.۱۳.۲
..... ۵۷	..... وابستگی تغییر شکل برای شکل های کلی	..... ۱۴.۲
..... ۵۷	..... انرژی کولنی	..... ۱.۱۴.۲
..... ۵۸	..... انرژی سطحی	..... ۲.۱۴.۲
..... ۶۰	..... فصل سوم	..... ۳
..... ۶۱	..... مقدمه	..... ۱.۳
..... ۶۳	..... معادله هندسی سطح هسته برای شکافت دوگانه	..... ۲.۳
..... ۶۹	..... لختی دورانی هسته در حال شکافت دوگانه	..... ۱.۲.۳
..... ۷۱	..... محاسبه انرژی کولنی در شکافت دوگانه	..... ۲.۲.۳
..... ۷۴	..... محاسبه انرژی سطحی در شکافت دوگانه	..... ۳.۲.۳
..... ۷۷	..... محاسبه پتانسیل الکتریکی سطح هسته در شکافت دوگانه	..... ۴.۲.۳
..... ۷۹	..... حل انتگرال های انرژی به روش های عددی	..... ۳.۳
..... ۷۹	..... هسته های با تقارن محوری	..... ۱.۳.۳
..... ۸۴	..... انتگرال های عددی	..... ۴.۳
..... ۸۵	..... هسته های بدون تقارن بازتابی	..... ۱.۴.۳
..... ۸۶	..... هسته های با تقارن بازتابی	..... ۲.۴.۳

۸۸	فصل چهارم	۴
۸۹	مقدمه	۱.۴
۹۱	معادله هندسی سطح هسته برای شکافت سه گانه شبه متقارن	۲.۴
۹۲	محاسبه حجم هسته در حال شکافت سه گانه شبه متقارن	۱.۲.۴
۹۷	سطح هسته در حال شکافت سه گانه شبه متقارن	۲.۲.۴
۹۷	انرژی کولنی هسته در حال شکافت سه گانه شبه متقارن	۳.۲.۴
۹۹	ناتقارنی بار و جرم در شکافت سه گانه شبه متقارن	۴.۲.۴
۱۰۲	انرژی کولنی هسته در حال شکافت سه گانه شبه متقارن	۵.۲.۴
۱۰۳	تعمیم مدل <i>FRNFM</i> برای شکافت سه گانه شبه متقارن	۶.۲.۴
۱۰۴	تعمیم مدل <i>Y+EM</i> برای شکافت سه گانه شبه متقارن	۷.۲.۴
۱۰۵	انرژی حجمی در شکافت سه گانه شبه متقارن	۸.۲.۴
۱۰۶	ارائه معادله هندسی شکل سطح هسته در شکافت نامتقارن	۳.۴
۱۱۰	تعمیم انرژی کولنی برای شکافت سه گانه نامتقارن	۱.۳.۴
۱۱۱	تعمیم مدل <i>FRNFM</i> برای شکافت سه گانه نامتقارن	۲.۳.۴
۱۱۲	تعمیم مدل <i>Y+EM</i> برای شکافت سه گانه نامتقارن	۳.۳.۴
۱۱۴	انرژی حجمی در شکافت سه گانه نامتقارن	۴.۳.۴
۱۱۴	ناتقارنی بار و جرم در شکافت سه گانه نامتقارن	۵.۳.۴
۱۱۵	برخی نتایج شکافت سه گانه نامتقارن به روش های عددی و مونتِه کارلو	۴.۴
۱۲۰	فصل پنجم	۵
۱۲۱	مقدمه	۱.۵
۱۲۳	انرژی های مختلف مؤثر در سد پتانسیل شکافت دوگانه	۲.۵
۱۲۸	سد پتانسیل شکافت دوگانه	۱.۲.۵
۱۲۹	نتیجه گیری محاسبات مربوط به شکافت دوگانه	۳.۵
۱۳۰	انرژی های مختلف مؤثر در شکافت سه گانه	۴.۵
۱۳۴	سد پتانسیل شکافت سه گانه	۱.۴.۵
۱۳۶	مسیر پاره هادر شکافت سه گانه شبه متقارن	۵.۵
۱۳۷	جرم مؤثر	۶.۵
۱۳۹	نتیجه گیری محاسبات مربوط به شکافت سه گانه شبه متقارن	۷.۵

۱۳۹.....	نتیجه ای از معادله هندسی شکافت سه گانه نامتقارن .....	۸.۵
۱۴۰.....	پیشنهاد.....	۹.۵

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱. نیمه عمرهای شکافت خودبخود ( $T_f$ ) اندازه گیری شده برحسب پارامتر شکافت پذیری ( $Z^2/A$ ) ..... ۱۷
- شکل ۲-۱. گسیل ذره  $\alpha$  در شکافت سه گانه هسته کالیفرنیم با برد بلند ..... ۲۰
- شکل ۳-۱. رسم نوعی و شماتیکی چندین دره انرژی پتانسیل ..... ۲۴
- شکل ۴-۱. شمای جفت شدگی برای هسته های تغییر شکل یافته ..... ۲۶
- شکل ۵-۱. نمایش شماتیکی حرکت های هسته ای ..... ۳۰
- شکل ۶-۱. انرژی به عنوان تابعی از پارامتر تغییر شکل  $\varepsilon$  که با  $\beta$  با یک ضریب در ارتباط است بر اساس گزارش آر. وندنبوش  $R$ . ..... ۳۲
- شکل ۱-۲. انرژی قیدی برحسب تعداد نوکلئون ..... ۴۰
- شکل ۲-۲. سیستم هسته ای با چگالی بار متفاوت ..... ۴۴
- شکل ۱-۳. شکل سطح هسته بدست آمده از معادله (۱-۳) ..... ۶۵
- شکل ۲-۳. منحنی پارامترهای  $S_1$ ,  $S_2$  برحسب  $a$  که پایستگی حجم را ارضا می کنند، به ازای  $\beta = 0.15$  منحنی توپر نمودار  $S_1$  برحسب  $a$  و دیگری  $S_2$  برحسب  $a$  می باشد. ..... ۶۸
- شکل ۳-۳. شکل هسته هنگام شکافت دوگانه نامتقارن در موردی که نسبت حجم پاره های نهایی دو به یک باشد. ..... ۶۸
- شکل ۴-۳. تقسیم سطح هسته در حال شکافت به صفحات دایروی موازی برای استفاده از قضیه محورهای موازی. ..... ۶۹
- شکل ۵-۳. منحنی لختی دورانی بهنجار برحسب  $S_1$  (منحنی قرمز رنگ) و نمودار  $I_X$  برحسب  $S_2$  (منحنی آبی رنگ) برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم پاره سمت چپ دو برابر پاره سمت راست است. ..... ۷۰
- شکل ۶-۳. نمودار  $I_X$  برحسب  $S_1, S_2$  در فضای سه بعدی ( $I_X, S_1, S_2$ ) برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم پاره سمت چپ دو برابر پاره سمت راست است. ..... ۷۱
- شکل ۷-۳. نمودار انرژی کولنی بدون بعد  $B_C$  برحسب  $S_1$  منحنی قرمز رنگ و برحسب  $S_2$  منحنی آبی رنگ، برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم پاره سمت چپ دو برابر پاره سمت راست است. ..... ۷۳
- شکل ۸-۳. منحنی  $B_C$  برحسب  $S_1, S_2$  در فضای سه بعدی ( $B_C, S_1, S_2$ ) برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم پاره سمت چپ دو برابر پاره سمت راست است. ..... ۷۴
- شکل ۹-۳. نمودار تغییرات انرژی سطحی بهنجار برحسب  $S_1$  منحنی قرمز رنگ و برحسب  $S_2$  منحنی آبی رنگ برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم پاره سمت چپ دو برابر پاره سمت راست است. ..... ۷۵
- شکل ۱۰-۳. نمودار تغییرات  $B_s$  برحسب  $S_1, S_2$  در فضای سه بعدی ( $B_s, S_1, S_2$ ) برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم پاره سمت چپ دو برابر پاره سمت راست است. ..... ۷۶
- شکل ۱۱-۳. شکل سطح هسته و کمیت  $V_s$  مربوط به آن به ازای مقادیر مختلف  $S_1, S_2$  برای شکافت دوگانه نامتقارنی که حجم نهایی پاره سمت چپ دو برابر حجم نهایی پاره سمت راست است. منحنی های بسته شکل سطح هسته و منحنی های باز کمیت  $V_s$  هستند، محور افقی  $Z$  در معادله (۳-۳) است. اما محور عمودی  $X$  در معادله (۳-۳) برای شکل سطح هسته می باشد و این محور مقدار  $V_s$  برای منحنی های پتانسیل الکتریکی بهنجار است. ..... ۷۸
- شکل ۱-۴. محصول ذرات سه گانه در واکنش ( $n_{th}f$ ) با نوترون های حرارتی، نسبت به شکافت دوگانه <sup>[۱]</sup> ..... ۸۹
- شکل ۲-۴. شکل سطح هسته داده شده بوسیله معادله (۱-۴) ..... ۹۱

- شکل ۳-۴. منحنی هریک از پارامترهای  $S_1, S_2, S_3$  برحسب  $a$  که پایستگی حجم را ارضا می کنند، به ازای  $\beta = 0.15$  منحنی توپر نمودار  $S_1$  برحسب  $a$  و دیگری  $S_2$  برحسب  $a$  می باشد. ۹۶
- شکل ۴-۴. (a) منحنی  $B_s$  برحسب  $S_1$  برای پلوتونیم  $^{240}$  در دو حالت شکافت متقارن  $\beta_1 = 1$  و شکافت همراه با گسیل ذره  $\beta_1 = 0.31$  (شبه متقارن)، (b) منحنی  $I_{\perp}$  برحسب  $S_1$  برای پلوتونیم  $^{240}$  در دو حالت شکافت متقارن  $\beta_1 = 1$  و شکافت همراه با گسیل ذره  $\beta_1 = 0.31$  (شبه متقارن) و (c) منحنی  $B_s, r/R$  برحسب  $S_1$  برای پلوتونیم  $^{240}$  در دو حالت شکافت متقارن  $\beta_1 = 1$  و شکافت همراه با گسیل ذره  $\beta_1 = 0.31$  (شبه متقارن). ۹۹
- شکل ۴-۵. شکل سطح هسته و منحنی پتانسیل الکتریکی بدون بعد  $V_s$  و انرژی کولنی وابسته برای شکافت سه گانه متقارن. ۱۰۱
- شکل ۴-۶. شکل سطح هسته داده شده بوسیله معادله (۴-۵۲). ۱۰۷
- شکل ۴-۷. منحنی پارامترهای  $S_1, S_2, S_3$  به عنوان تابعی از پارامتر  $a$  که پایستگی حجم را در تمام مراحل شکافت حفظ می کند. ۱۰۹
- شکل ۴-۸. شکل سطح هسته در مراحل مختلف شکافت کاملاً نامتقارن برای حالتیکه نسبت نهایی حجم های سه پاره شکافت طبق شکل به ترتیب از راست به چپ ۴:۱:۲ است. ۱۱۶
- شکل ۴-۹. منحنی لختی دورانی حول محور  $X$  برحسب پارامترهای  $S_1$  و  $S_2$  برای شکافت سه گانه نامتقارن برای حالتیکه نسبت نهایی حجم های سه پاره شکافت به ترتیب از راست به چپ ۴:۱:۲ است. ۱۱۷
- شکل ۴-۱۰. منحنی لختی دورانی حول محور  $X$  برای شکافت سه گانه کاملاً نامتقارن برای حالتیکه نسبت نهایی حجم های سه پاره شکافت به ترتیب از راست به چپ ۴:۱:۲ است به عنوان تابعی از دو پارامتر  $S_1$  و  $S_2$  در فضای سه بعدی  $(BC, S_1, S_2)$ . ۱۱۷
- شکل ۴-۱۱. انرژی کولنی وابسته برای حالتیکه نسبت نهایی حجم های سه پاره شکافت طبق شکل (۴-۸) به ترتیب از راست به چپ ۴:۱:۲ است به عنوان تابعی از  $S_1$  منحنی قرمز رنگ و  $S_3$  منحنی آبی رنگ. ۱۱۸
- شکل ۴-۱۲. انرژی کولنی وابسته برای حالتیکه نسبت نهایی حجم های سه پاره شکافت طبق شکل (۴-۸) به ترتیب از راست به چپ ۴:۱:۲ است به عنوان تابعی از دو پارامتر  $S_1$  و  $S_3$  در فضای سه بعدی  $(BC, S_1, S_3)$ . ۱۱۸
- شکل ۵-۱. نمودار تغییرات انرژی کولنی برحسب فاصله جدایی پاره های شکافت برای هسته  $^{236}U$ . منحنی سبز رنگ برای شکافت متقارن می باشد و منحنی های قرمز و آبی همانطور که روی شکل مشخص شده است برای شکافت نامتقارن با ناتقارنی های متفاوت فرضی هستند. ۱۲۴
- شکل ۵-۲. شکل سطح هسته اورانیم  $^{236}$  حین شکافت دوگانه لحظه ای قبل از جدا شدن پاره ها برای شکافت متقارن و نامتقارن به همان ترتیب ذکر شده در شکل (۵-۱). ۱۲۴
- شکل ۵-۳. تغییرات انرژی یوکاوا/نمایی برای شکافت های مختلف دوگانه اورانیم  $^{236}$  برحسب فاصله بین مرکز جرم پاره. مشخصات هسته های حاصل از شکافت و منحنی های مربوطه روی شکل با رنگ های مختلف مشخص شده است. ۱۲۶
- شکل ۵-۴. تغییرات انرژی حجمی برای شکافت های مختلف دوگانه اورانیم  $^{236}$  برحسب فاصله بین مرکز جرم پاره. مشخصات هسته های حاصل از شکافت و منحنی های مربوطه روی شکل با رنگ های مختلف مشخص شده است. ۱۲۷
- شکل ۵-۵. سد شکافت دوگانه برحسب فاصله بین مرکز جرم پاره ها برای سه نوع شکافت دوگانه مختلف فرضی اورانیم  $^{236}$ ، نوع شکافت و محصولات با رنگ های مختلف روی شکل مشخص شده اند. ۱۲۹
- شکل ۵-۶. منحنی انرژی کولنی هسته  $^{240}Pu$  در حال شکافت سه گانه شبه متقارن برحسب فاصله بین مرکز جرم پاره های بیرونی در سه حالت. نوع پاره های شکافت و منحنی هر کدام از شکافت ها با رنگ معینی روی شکل مشخص شده است. ۱۳۱
- شکل ۵-۷. منحنی تغییرات انرژی یوکاوا/نمایی حین شکافت سه گانه شبه متقارن هسته  $^{240}Pu$  در سه حالت برحسب فاصله بین مرکز جرم پاره های بیرونی، مشخصات و منحنی هر شکافت بوسیله معادله های مربوطه و رنگ روی شکل از هم متمایز شده اند. ۱۳۱
- شکل ۵-۸. منحنی انرژی حجمی برحسب فاصله بین مرکز جرم دو پاره بیرونی در شکافت سه گانه شبه متقارن  $^{240}Pu$  در سه حالت در  $c, b, a$ . مشخصات پاره روی هر قسمت نوشته شده است. ۱۳۲

شکل ۹-۵. شکل سطح هسته  $^{240}\text{Pu}$  لحظه ای قبل از شکافت سه گانه شبه متقارن در سه مورد، که هر کدام با رنگی از بقیه متمایز شده است. مشخصات پاره ها در هر مورد روی شکل نوشته شده است. ۱۳۳.....

شکل ۱۰-۵. نمودار سه بعدی (انرژی کل، عدد جرمی پاره میانی ( $A_p$ )، فاصله بین مرکز جرم پاره های بیرونی) برای شکافت سه گانه شبه متقارن پولتونیم  $^{240}$ . محصولات شکافت روی شکل نوشته شده است. ۱۳۴.....

شکل ۱۱-۵. نمودار پربندی عدد جرمی پاره میانی ( $A_p$ ) بر حسب فاصله بین مرکز جرم دو پاره بیرونی در شکافت سه گانه شبه متقارن  $^{240}\text{Pu}$ . مشخصات پاره های شکافت روی شکل نوشته شده است. ۱۳۵.....

شکل ۱۲-۵. سد پتانسیل شکافت برای شکافت سه گانه شبه متقارن  $^{240}\text{Pu}$  بر حسب فاصله بین مرکز جرم پاره های بیرونی در سه مورد مختلف. هر کدام از منحنی ها با رنگی از بقیه متمایز شده است و مشخصات پاره های حاصل روی شکل نوشته شده است. ۱۳۶.....

شکل ۱۳-۵. مسیر حرکت پاره های شکافت سه گانه شبه متقارن  $^{240}\text{Pu}$  در سه حالت مورد بررسی. مشخصات هر کدام از شکافت ها روی شکل مشخص شده است. ۱۳۸.....

شکل ۱۴-۵. مسیر پاره های شکافت در شکافت سه گانه نامتقارن  $^{252}\text{Cf}$ . مشخصات پاره ها روی شکل مشخص شده است. ۱۴۰.....

## چکیده

با معرفی مدل قطره مایع و جملات وابسته به تغییر شکل آن به بررسی پدیده شکافت پرداخته ایم. روش های مختلف محاسبه انرژی مؤثر سد شکافت ارائه شده است. برای بررسی و محاسبه سد پتانسیل شکافت از روش "ارائه معادله هندسی" استفاده شده است و دو نوع معادله هندسی برای شکافت های دوگانه و سه گانه به تفصیل مورد بحث قرار گرفته شده است. برای شکافت دوگانه، براساس معادله هندسی مورد بررسی برنامه ای رایانه ای نوشته ایم که سد پتانسیل شکافت و چند پارامتر مهم فیزیکی دیگر را می دهد. همچنین برای شکافت سه گانه شبه متقارن برنامه رایانه ای نرم افزاری دیگری به زبان برنامه نویسی فرترن نوشته ایم که بوسیله آن می توان سد پتانسیل شکافت هر هسته ای را بدست آورد؛ خروجی این برنامه رایانه ای چند کمیت مهم در شکافت سه گانه را ارائه می نماید.

با اجرای برنامه های مربوط به شکافت دوگانه و سه گانه نتایج را با داده های تجربی مقایسه کرده ایم تا صحت هرکدام بررسی شود.

در پایان برای شکافت سه گانه نامتقارن (کلی ترین حالت شکافت سه گانه) معادله ای ارائه کرده ایم و نتیجه ای از محاسبات مربوط به این معادله را برای یک شکافت سه گانه نامتقارن نوعی آورده ایم.



## Abstract

We have studied Fission process by introducing Liquid Drop Model (LDM) and deformation dependent terms of this model. Various methods of calculating effective energies on fission barrier have been presented. For surveying and calculating fission barrier we have used parameterization method. Two types of parameterizations for binary and ternary fission have been discussed. We have developed a computer program in FORTRAN which gives some important physical quantities of binary fission for any nucleus. We have developed a computer program in FORTRAN which gives fission barrier of quasi-symmetry ternary fission for any nucleus. This program also gives some important ternary fission quantities.

Fission barriers due to these parameterizations have been compared with experimental data.

Finally, we have introduced a parameterization for asymmetry fission for the first time and have presented a result of this type of parameterization.

## مقدمه

برای شناخت سازوکار پدیده شکافت، دیدگاه‌های مختلفی ارائه شده است. برخی مدل‌ها از جنبه ماکروسکوپی به توضیح و توجیه بعضی از خصوصیات این فرآیند پرداخته‌اند. با اعمال تصحیحات میکروسکوپی خصوصیات دیگری از این پدیده توجیه شده است. برخی از محققین نیز با استفاده از جنبه‌های کاملاً میکروسکوپی، به تفسیر این نوع از واپاشی هسته‌ای همت گمارده‌اند.

از دیدگاه ماکروسکوپی، رایج‌ترین مدل برای بررسی شکافت مدل قطره مایع است. برای این کار باید تمام انرژی‌های وابسته به تغییر شکل در مدل قطره مایع را محاسبه کرد. انرژی‌های وابسته به تغییر شکل در مدل قطره مایع، انرژی کولنی، انرژی سطحی و حجمی می‌باشند. برای محاسبه این انرژی‌ها دانستن چگونگی تحول هسته در حال شکافت الزامی می‌باشد. با توجه به اینکه چگونگی تحول هسته هنگام شکافت و توزیع جرم و بار الکتریکی در این فرآیند نامشخص است روش رایج نسبت دادن یک معادله هندسی به سطح هسته است. در این روش توسط پیشنهاد معادله‌ای، می‌توان انرژی‌های کولنی، سطحی و حجمی را در مراحل مختلف شکافت محاسبه کرد.

در تغییر شکل‌های کوچک، انرژی سطحی متناسب با سطح است اما با افزایش تغییر شکل خصوصاً با شکل‌گیری گردنه‌ها در فرآیند شکافت، انرژی سطحی، متناسب با سطح نخواهد بود. وقتی گردنه‌ها ایجاد می‌شوند فاصله نوکلئون‌های سطحی واقع در دو طرف گردنه کم می‌شوند و شدیداً برهم‌کنش می‌کنند و این برهم‌کنش جاذبه در انرژی سطحی که متناسب با سطح در نظر گرفته می‌شود وجود ندارد. برای تصحیح انرژی سطحی مدل‌هایی ارائه شده است که در این کار تحقیقی این مدل‌ها را مورد بررسی قرار داده ایم.

معادله‌های هندسی گوناگونی برای بیان تحول سطح هسته تا کنون ارائه شده است. صحت و درستی هرکدام از این معادله‌های هندسی را می‌توان با انجام محاسبات مربوط به انرژی‌های وابسته به تغییر شکل و ارزیابی نتایج حاصل از این انرژی‌ها را با داده‌های تجربی، سنجید.

در این پروژه تحقیقاتی برای شکافت دوگانه (متقارن و نامتقارن) و شکافت سه‌گانه شبه‌متقارن یک نوع معادله هندسی رایج ارائه شده و بطور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر مورد، روش‌های مختلف محاسبه انرژی‌های وابسته به تغییر شکل توضیح داده شده است. پس از محاسبه این انرژی‌ها، ارتفاع سد پتانسیل شکافت را با نتایج تجربی مقایسه کرده ایم.

در پایان، برای اولین بار معادله‌ای پیشنهادی برای بیان تحول سطح هسته‌ای که دستخوش شکافت سه‌گانه نامتقارن شده است را ارائه می‌نماییم.

## ۱ فصل اول

پدیده شکافت از جنبه های مختلف

معمولاً وقتی از شکافت هسته صحبت می شود، بیشتر شکافت دوگانه مورد نظر است و بررسی شکافت های سه گانه و بالاتر بسیار کم انجام شده اند. تا کنون، داده های تجربی و نظری، بیشتر بر مبنای شکافت دوگانه هسته ارائه شده اند و نظریات مربوط به شکافت سه گانه در دست مطالعه است و هنوز نظریه ای که بتواند گسیل پاره های شکافت سه گانه را در زوایای مختلف مانند شکافت دوگانه (مدل های آماری *SSM: Scission Statistical Model* و *TSM: Transition State Model*) پیش بینی کند، ارائه نشده است. در واقع احتمال وقوع شکافت سه گانه به شکافت دوگانه برای هسته های مختلف متفاوت است اما عموماً از مرتبه  $10^{-3}$  می باشد.

پدیده شکافت از دیدگاه های ماکروسکوپی، ماکروسکوپی- میکروسکوپی و میکروسکوپی قابل بررسی می باشد. در این کار تحقیقاتی از جنبه ماکروسکوپی به بررسی شکافت های دوگانه و سه گانه پرداخته ایم.

یکی از مدل های ماکروسکوپی، مدل قطره مایع است. بوسیله این مدل می توان پدیده شکافت را نسبتاً خوب توصیف کرد.

یکی از روش های رایج برای بررسی شکافت از دیدگاه ماکروسکوپی، پیشنهاد معادله ای برای سطح هسته است. در این روش تحول سطح هسته، در مراحل مختلف شکافت بوسیله معادله هندسی سطح ارائه می شود.

با داشتن معادله سطح هسته در هر مرحله شکافت، با کمک مدل قطره مایع می توان تغییرات انرژی های مختلف را محاسبه کرد. به عبارت دیگر، برخی جملات ظاهر شده در مدل قطره مایع وابسته به تغییر شکل هسته هستند. انرژی های وابسته به تغییر شکل در مدل قطره مایع، انرژی کولنی، سطحی و حجمی می باشند.

احتمال شکافت را با محاسبه انرژی های متغیر در شکافت می توان بدست آورد. این محاسبات برای شکافت های دوگانه و سه گانه با روش های مختلف انجام می گیرد. در این پژوهش با دو روش، انرژی ها محاسبه شده است.

پس از محاسبه انرژی های وابسته به تغییر شکل در مدل قطره مایع انرژی سد پتانسیل شکافت بدست می آید. از روی منحنی انرژی سد پتانسیل شکافت احتمال نسبی شکافت دوگانه به سه گانه را می توان تخمین زد.

وقتی پاره های شکافت سه گانه در آستانه جدایی قرار می گیرند، تحت تأثیر دافعه کولنی از یکدیگر دور می شوند و هر کدام از پاره های شکافت مسیری را طی خواهند نمود. با حل معادله های حرکت سیستم شامل پاره های شکافت، پس از جدا شدن آنها، می توان مسیر حرکت هریک از پاره ها را بدست آورد.

انرژی سطحی معمولاً متناسب با سطح هسته در نظر گرفته می شود. اما وقتی گردنه ها بوجود می آیند، نوکلئون های واقع در محل گردنه ها باهم برهم کنش می کنند و انرژی سطحی متناسب با سطح هسته نخواهد شد و می توان از مدل *یوکاوا/نمایی* جایگزین مناسبی برای انرژی سطحی ارائه نمود.

## ۲.۱ شکافت و واپاشی آلفایی

واپاشی آلفایی در سال ۱۸۹۶ بوسیله بکرل کشف شد و از اولین مشاهدات مدهای واپاشی هسته ای بود. پدیده واپاشی آلفایی همچنین یک ابزار تشخیص ساختار هسته است. جنبه های جذاب واپاشی آلفایی این است که روابط جرم، انرژی و پهنای واپاشی نسبتاً ساده ای دارد. ذرات  $\alpha$  با دقت بالا به آسانی آشکارسازی می شوند، زمینه کمی دارند و انرژی شان را با دقت زیاد می توان تعیین کرد. ساختار هسته مبتنی بر انرژی حالت پایه واپاشی، مقادیر فزونی جرم، سطوح انرژی ایزومری و حالت های برانگیخته، اسپین و اطلاعات سطوح انرژی هسته های والد و دختران آن می باشد.

## ۳.۱ ارتباط واپاشی آلفایی با ساختار هسته

انرژی ذره  $\alpha$  خروجی یک واپاشی آلفایی که با لحاظ اثر پس زنی، تصحیح شده است، انرژی کل واپاشی آلفایی ( که با  $Q_\alpha$  نشان داده می شود) را می دهد. این انرژی با جرم اتمی  $M$  طبق معادله زیر در ارتباط است.

$$M(Z, N)c^2 = M(Z-2, N-2)c^2 + M(^4\text{He}) + Q_\alpha \quad ۱-۱$$

برای هسته های دور از ناپایداری،  $Q_\alpha$  در اغلب موارد فقط اطلاعات قابل دسترس درباره اختلاف جرم اتمی را می دهد. در برخی موارد نیز تعیین جرم های اتمی جدید را ممکن می سازد. به علاوه اگر نیمه عمر هسته مادر  $T_{1/2}(N, Z)$  و احتمال نسبی گسیل  $b_\alpha$  معلوم باشد، می توان احتمال واپاشی آلفایی  $\lambda^{(\alpha)}$  را تعیین کرد [۱].

$$\lambda^{(\alpha)} = b_\alpha \ln(2) / T_{1/2} \quad ۲-۱$$

نتایج محاسبات نظری تطابق خوبی با احتمال واپاشی اندازه گیری شده  $\lambda^{(\alpha)}$  دارد. ثابت واپاشی مطابق با روش گاموف  $Gamow$  در ساده ترین حالت برای یک هسته کروی، بصورت زیر است [۱].

$$\lambda_G^{(\alpha)} = (v_\alpha / 2R_i).P \quad ۳-۱$$

که ذره  $\alpha$  با سرعت  $v_\alpha$  درون هسته حرکت می کند و سرعت آن از معادله زیر بدست می آید [۲].

$$v_{\alpha} = (2(U_0 + Q_{\alpha} + \Delta E_{scr}) / M_{\alpha})^{1/2} \quad 4-1$$

$U$ . عمق پتانسیل هسته ای  $U(R)$  می باشد و تصحیح پرده ای (*screening*) که ناشی از الکترون های اتمی است از معادله (4-1) بدست می آید [۱].

$$\Delta E_{scr} = (65.3 \cdot Z^{7/5} - 80 \cdot Z^{2/5}) (MeV) \quad 5-1$$

که  $Z$  عدد اتمی می باشد. در این تصویر ساده احتمال واپاشی عبارت است از "فرکانس درزنی" ("*knocking frequency*")  $\nu_{\alpha} / 2R_i$  در سد و نفوذپذیری  $P$  که برای موج  $s$  از تقریب *WKB* برای مسئله یک بعدی بدست می آید [۲].

$$P = \exp \left\{ -2 \int_{R_i}^{R_a} [(2M_{\alpha} / \hbar^2)(U(R) - Q_{\alpha} - \Delta E_{scr})]^{1/2} dR \right\} \quad 6-1$$

که  $R_a$  و  $R_i$  نقاط برگشت داخلی و خارجی برای مسیر ذره *آلفای* کلاسیکی هستند. یک راه دیگر محاسبه احتمال تشکیل و مقایسه با نتایج تجربی است. میزان مطلق واپاشی *آلفایی* را برای اولین بار *مانگ Mang* بر اساس نظریه میکروسکوپی با استفاده از توابع موج لایه ای بدست آورد. بعد از آن *فشیباخ Fliessbach* و *مانگ Mang* محاسبات را تصحیح کردند و تطابق خوبی با نتایج تجربی واپاشی *آلفایی* واکنش های  $^{212}Po \rightarrow ^{208}Pb + \alpha$ ,  $^{211}Po \rightarrow ^{207}Pb + \alpha$  حاصل شد.

شکافت خودبخودی بوسیله *پترژاک Petrzhak* و *فلروف Flerov* [۳] یک سال پس از کشف شکافت القایی نوترون های حرارتی (*Hahn, Strassmann* [۴]) مطابق پیش بینی *بوهر Bohr* و *ویلر Wheeler* (در سال ۱۹۳۹) کشف شد. زودتر از آن در سال ۱۹۲۸ *گاموف Gamow* و بطور مستقل *کاندون Condon* و *گامی Gurney* واپاشی *آلفایی* را به عنوان یک پدیده تونل زنی کوانتومی از درون سد کولنی توضیح دادند. تشابه بین این دو پدیده از ابتدا مشخص بود. *سگره Segre* کارهایی را که در مورد شکافت خودبخودی هسته های سنگین تا ژوئن ۱۹۴۶ در *لوس آلاموس* توسط وی و همکارانش انجام یافته بود گزارش کرد.

## ۴.۱ شکافت هسته

پدیده شکافت هسته بسیار پیچیده و هنوز کاملاً شناخته نشده است و بین جنبه های ماکروسکوپیکی و میکروسکوپیکی در نوسان است. در ۱۹۶۷ مدلی حد واسطه ای توسط یک محقق اهل روسیه به نام *استروتینسکی* ارائه شد. این مدل به سرعت و با دقت زیاد جای خود را باز کرد و مورد پذیرش قرار گرفت.

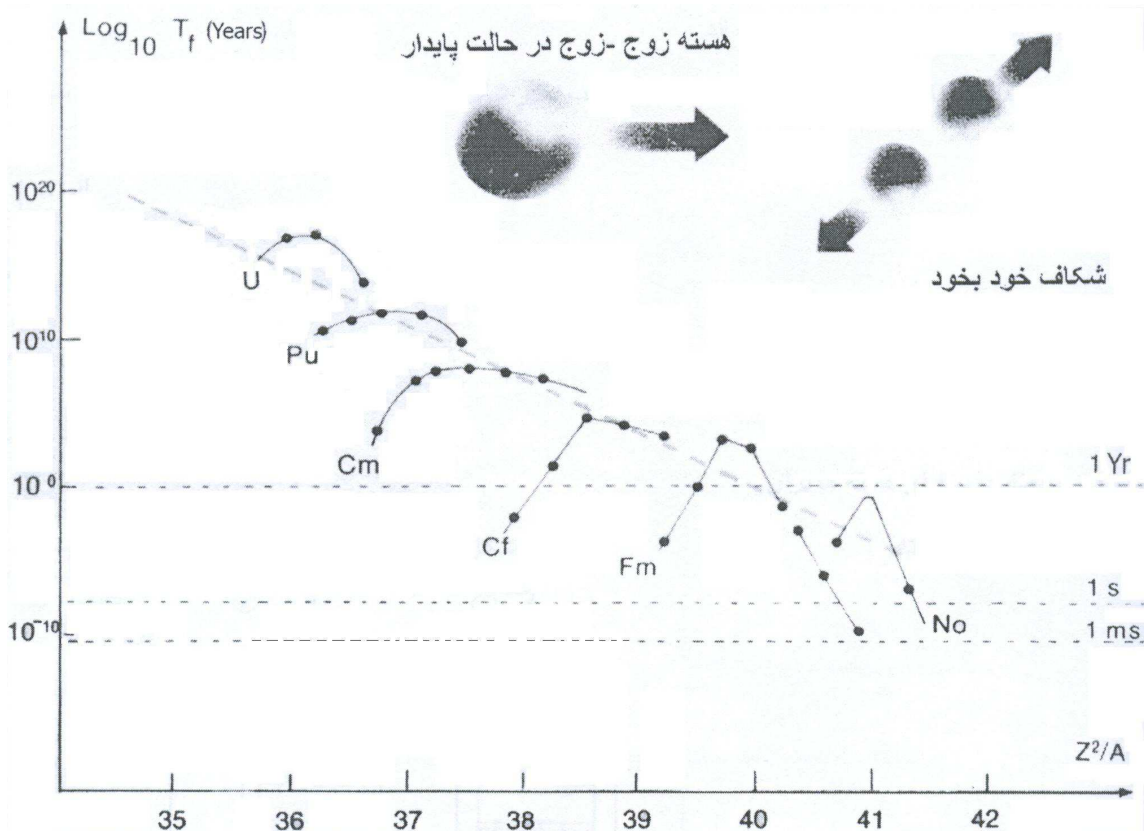
انرژی پتانسیل یک هسته سنگین ( $Z > 89$ ) معمولاً برحسب تغییر شکل نمایش داده می شود، که بر مبنای مدل ماکروسکوپی قطره مایع محاسبه می گردد. در نقطه برش، هسته به دو پاره مماس باهم تبدیل می شود که آماده جدا شدن می باشند. در این حال انرژی پتانسیل به صورت سدی نمایان می شود که باید سیستم شکافنده بر آن غلبه کند، و لذا آن را **سد پتانسیل** می نامند. در واقع بیشینه این سد مربوط به یک **نقطه زینی** است، زیرا سطح انرژی پتانسیل در فضای سه بعدی شبیه به یک زین اسب می باشد. از این رو نیاز به دو پارامتر تغییر شکل داریم. ارتفاع نقطه زین نسبت به حالت پایه را **ارتفاع سد پتانسیل** گویند، که برای هسته های متعلق به خانواده آکتینیدها حدود  $6\text{MeV}$  است. سد پتانسیل شکافت در نقطه برش متوقف می شود و بعد از آن این انرژی نشان دهنده پتانسیل کولنی بین دو پاره شکافت است. سد پتانسیل شکافت را گاهی برای خلاصه نویسی سد شکافت می نویسند. برای بدست آوردن سد شکافت با دقت بیشتر می پذیریم که هسته " تقریباً " به صورت کلاسیکی تلقی شود. کلمه " تقریباً " به یک تصحیح کوانتومی  $\Delta E_q$  دلالت می کند که در مسیر شکافت از آن استفاده می شود. به روش مدل استروتنسکی می گویند.

این تصحیح طبق حالت کوانتومی هسته برحسب تغییر شکل آن متغیر می باشد. یکی از این موارد ظاهر شدن پوسته های متناظر با گروه های ترازهای انرژی کوانتیده نوکلئون ها است.

در مجاورت یک پوسته، هسته در مقایسه با پیش بینی های مدل قطره مایعی پایدارتر (مقیدتر) است. این امر به یک تصحیح منفی منجر می شود. اما در بین پوسته های بسته، هسته کمتر مقید است، و تصحیح کوانتومی مثبت می باشد. بنابراین با یک تصحیح  $\Delta E_q$  سرو کار داریم که دارای یک ویژگی نوسانی برحسب تغییر شکل است.

از روی نیمه عمر شکافت خود به خود یک هسته می توان به قدرت نفوذ در سد شکافت آن هسته پی برد. در واقع هرچه نیمه عمر کوتاه تر باشد قدرت نفوذ زیادتر است. مطابق شکل (۱-۱) نقاط دایره ای سیاه متناظر با هسته های زوج-زوج در حالت پایه آنها می باشد، یعنی هسته هایی که تعداد پروتون ها و نوترون های آنها زوج هستند. خطوط سیاه توپر معرف نتایج برای خانواده های مختلف ایزوتوپ ها است. نقاط خط چین معرف یک کاهش میانگین در نیمه عمر است که می تواند از روی یک مدل ماکروسکوپی بدست آید. هرچه  $Z$  زیادتر باشد بیشینه ای که برای هر خانواده ایزوتوپ بدست می آید تیزتر است، زیرا در آن ساختارهای پوسته ای اثر می گذارد.





شکل ۱-۱. نیمه عمرهای شکافت خودبخود ( $T_f$ ) اندازه گیری شده برحسب پارامتر شکافت پذیری ( $Z^2/A$ ).

## ۵.۱ شکافت سه گانه

اندکی پس از کشف شکافت هسته ای *Perzent* با استفاده از مدل قطره مایع می توان شکافت سه پاره ای یا شکافت سه گانه را بررسی کرد. که در آن یک هسته برانگیخته به سه پاره با جرم های حدود هم تقسیم می شود.

روزن و هادسون در گزارش مقدماتی خود، مربوط به سه تکه شدن  $^{235}\text{U}$  در بمباران با نوترون های کند، به ازای هر  $10^6$  شکافت دوگانه حدود  $4/3$  شکافت سه گانه یافته بودند (که البته این نسبت برای شکافت خودبخودی متفاوت است). در کارهای دیگری که روی شکافت سه گانه انجام شد، ابتدا دو پاره سنگین همراه با یک ذره سوم که معمولاً **ذره آلفا** با برد بلند بود، و در مواردی نیز ذره تقریباً سنگین تری از *آلفا* مشاهده شد است.

این نتایج کاملاً شبیه آن چیزی است که در شکافت القایی/اورانیم و پلوتونیوم توسط نوترون کند به دست آمده بود. آنها نتیجه گرفتند که انرژی جنبشی پاره های شکافت، کاملاً از میدان کولنی بین یون ها سرچشمه می گیرد و به نحوه ایجاد شکافت بین پاره های آنها بستگی ندارد.

وقتی معمولاً یک ذره سبک با انرژی کمتر از  $50 \text{ MeV}$  با یک هسته بر هم کنش می کند، ممکن است یک هسته مرکب تشکیل شود که به همراه آن وانگیختگی هسته پیش آید، اما وقتی انرژی فرودی به حدود  $GeV$  می رسد، معمولاً هسته مرکب تشکیل نمی شود و تعداد زیادی نوکلئون و هسته های کم و بیش سنگین گسیل می شوند.

روش های مختلف تجربی وجود سه پاره شدن هسته سنگین را نشان می دهند. این روش های تجربی با تکنیک های مختلف مانند امولسیون هسته ای، آشکارسازهای پلاستیکی، روش هم فرودی سه گانه بین سه آشکارساز نیمه هادی، آنالیز رادیوشیمیایی، اتافک های یونش با چندین محفظه و... مورد مطالعه قرار گرفته اند.

آنها از تعداد زیادی پرتابه مثل نوترون های حرارتی، ذرات  $\alpha$ ، اشعه گاما، پروتون های انرژی بالا و یون های سنگین برای این مطالعه استفاده کردند. به طور نظری وجود چند پاره شدن از روی کارهای پرزنت و نیپ پیش بینی شده بود، که مدل مورد استفاده بر مدل قطره مایع بوهر و ویلر استوار بود. در سال ۱۹۵۸ سویاتکی متذکر شد که اگر پارامتر شکافت پذیری بیشتر از  $0.65$  باشد شکافت سه گانه می تواند در ناحیه [فرمیوم ( $Fm$ ) - بیسموت ( $Bi$ )] انرژی بیشتری از شکافت دو گانه تولید کند. برای هسته های سنگین تر از اورانیوم، معمولاً تقسیم به چهار یا پنج پاره شدن هسته نیز امکان پذیر است. استروتنیسی با بررسی شکل تعادل هسته ای که منجر به شکافت می شود، نشان داد که در فرایند آرایشی، با ظهور یک گردنه بین دو هسته تغییر شکل یافته، منجر به پیدایش آرایش های پیچیده تری با دو گردنه می شود و بالاخره به شکافت سه گانه منجر می گردد.

موزیچکا و همکارانش [۵] با ملاحظه نتایج کرمیان و همکارانش [۶] روی شکافت سه گانه القایی توسط یون های سنگین که از خلال تشکیل هسته مرکب صورت گرفته است، دو مکانیسم ممکن برای این پدیده پیشنهاد کردند.

الف) تغییر شکل هسته مرکب حاصل، که منجر به تغییر شکل از یک آرایش دو گردنی می گردد و هسته به سه پاره شبیه به هم در مدت زمان حدود  $10^{-21} \text{ s}$  تقسیم می گردد.

ب) هسته مرکب به صورت نامتقارن به یک پاره سبک و یک پاره سنگین با مقدار زیاد پارامتر شکافت پذیری  $x$  تقسیم می شود.

اگر پاره سنگین انرژی تحریکی کافی داشته باشد، احتمال شکافت مجدد زیاد خواهد بود و این را شکافت آبشاری می گویند. مدل موزیچکا کانالهای واپاشی هسته را نمی دهد. یک توجیه نظری توسط فریزر و همکارانش ارائه شده است که بر طبق آن هسته

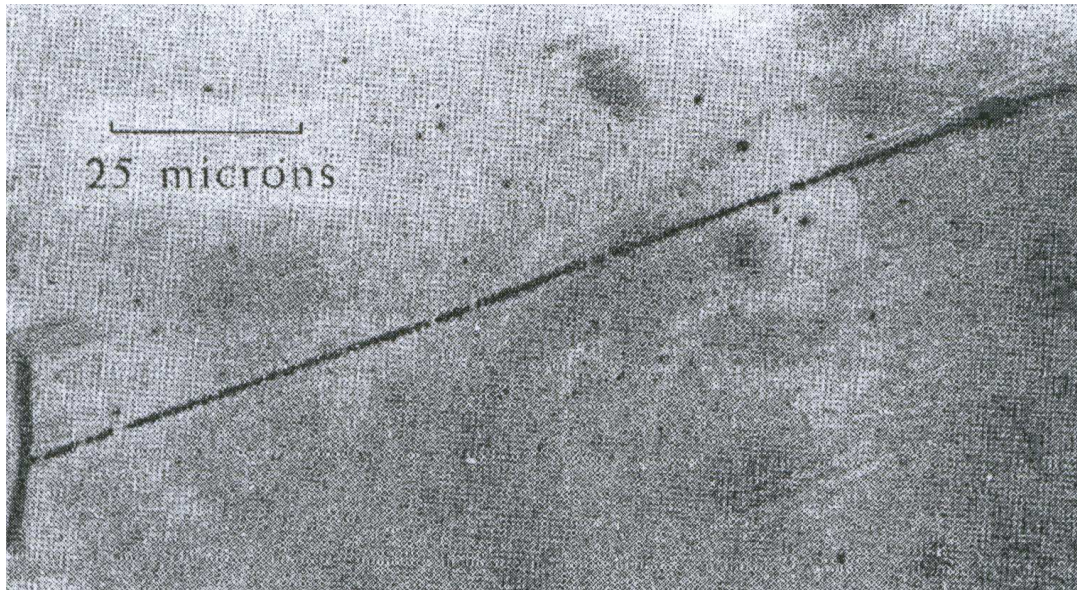
مرکب فوق سنگین، انرژی تحریکی خود را به صورت ارتعاشاتی در سطح خود ظاهر می سازد. این ارتعاشات شکل هسته را به صورت پخت (خوابیده) در قطب ها در می آورد (شبهه به پخی در قطبین کره زمین).

این تغییر شکل ممکن است منجر به سه پاره شدن هسته گردد.

## ۶.۱ آشکارسازی ذره $\alpha$ در شکافت خودبخود هسته $^{252}\text{Cf}$

روشی که در اینجا شرح داده می شود برای شناسایی ذره  $\alpha$  گسیل شده در شکافت سه گانه هسته کالیفرنیم می باشد. در این روش ۰/۰۱ سی سی از محلول کالیفرنیم با ۵ سی سی از جوهر نمک سدیم (با  $PH=5$ ) رقیق می شود. ۲ سی سی از این محلول را روی یک فیلم نازک به ابعاد  $1\text{cm} \times 2\text{cm}$  اندود می کنیم. از محلول کلودین برای چسباندن لبه های پاکت پلاستیکی محتوی فیلم استفاده می کنیم. (ضخامت فیلم ۲۰۰ میکرون است) محلول کلودین مربوطه به مدت یک ساعت در ظرفی دوار که حاوی محلول  $H_2SO_4$  (اسید سولفوریک) است قرار می گیرد. این ظرف مجهز به پنکه نیز می باشد تا هوای مناسب را تامین کند.

بعد از ۴۸ ساعت فیلم توسط ظاهر کننده مناسب، زیر میکروسکوپ قرار می گیرد. این ظاهر کننده حاوی چند ماده شیمیایی (۳۵ گرم اسید بوریک، ۱۵ گرم سولفیت سدیم، ۴/۵ گرم آمیدول و ۸ سی سی از محلول برمید پتاسیم) می باشد. پس از ثبوت، شستشو و خشک کردن آشکارساز می توان فیلم را مورد بررسی قرار داد. با استفاده از عامل درهمروی، میسر تولید شده ذرات  $\alpha$   $6.11\text{MeV}$  را که از شکافت کالیفرنیم گسیل می شوند، مشاهده و اندازه گیری می کنند. در واقع این فیلم ها با روش معینی با عدسی هایی با قدرت بزرگنمایی  $\times 45$  و یا  $\times 95$  زیر میکروسکوپ مشاهده می شوند. معمولاً نخستین مسیر کمرنگی که بعد از دو مسیر دیگر در فیلم دیده می شود مسیر ذره  $\alpha$  است. اگر شکافت سه گانه با پاره هایی با جرم های تقریباً یکسان روی دهد می توان انتظار داشت که سومین مسیر از وسط دو مسیر دیگر شروع شود. با این وجود در آزمایش فوق فقط رویدادهایی مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند که مسیر کمرنگ تر به فاصله ۵ میکرون از مسیر شکافت دوگانه اصلی ظاهر شوند. در شکل (۱-۲) عکس یک شکافت نوعی همراه با گسیل ذره  $\alpha$  که بردی بلند هم دارد، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱. گسیل ذره *آلفا* در شکافت سه گانه هسته کالیفرنیم با برد بلند. با اجازه از آقای دکتر رحیمی استاد فیزیک هسته ای دانشگاه فردوسی مشهد.

## ۷.۱ سازوکار شکافت از دیدگاه مدل قطره مایع

دو نفر به نام های میتنر *Meitner* و فریش *Frisch* [۷] پیشنهاد کردند محصولات با جرم میانی می توانند نتیجه شکافت باشند. آنها در یک فرآیند قابل قیاس با تقسیم بار الکتریکی مدل قطره مایع بوهر *Bohr* و ویلر *Wheeler* بطور مفصل رفتاری از یک چنین فرآیند شکافتی در سال ۱۹۳۹ ارائه کردند.

نیروهایی که بین نوترون ها و پروتون ها در هسته اثر می کنند کوتاه برد، مستقل از بار و نیز شامل دافعه کولنی پروتون ها می باشند. شکل فرض شده برای هسته، یک تعادل بین نیروهای هسته ای است که در واقع بطور ایده آل تعادل بین نیروی سطحی و دافعه کولنی است. قدرت نیروی سطحی برای تغییر شکل های کوچک با جمله تصحیح سطحی در فرمول نیمه تجربی که متناسب با سطح هسته است تخمین زده می شود. قدرت نیروی کولنی بوسیله بار پروتون ها (عدد اتمی هسته) با فرض توزیع پروتون ها در حجم هسته بدست می آید. انرژی برانگیختگی در صورت وجود باید به هسته اضافه شود و ارتعاشات هم به همین ترتیب، که این باعث افزایش سطح هسته و در نتیجه انرژی سطحی می شود. این نکته موجب بازگرداندن قطره مایع به حالت اصلی می شود. اگر نیروی الکترواستاتیک بزرگتر از کشش سطحی شود تغییر شکل رشد کرده و زیادتر می شود. در نتیجه ضرورتاً هسته ای که بصورت قطره مایع در نظر گرفته شده است،