



دانشگاه مازندران  
دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک هسته ای

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک هسته ای

موضوع:

مطالعه آهنگ واکنش همجوشی یون های سبک با کمک مدل اپتیکی

استاد راهنما :

دکتر محمد مهدوی

استاد مشاور :

دکتر سید محمد متولی

نام دانشجو :

یاسر بابائزاد

بهمن ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## سپاسگزاری

(( اَللّٰهُمَّ اِنِّىْ اَعُوْذُ بِكَ مِنْ عِلْمٍ لَا يَنْفَعُ ))

از تمامی کسانی که مرا در این راه یاری نمودند، از صمیم قلب سپاسگزاری می کنم.

## تقدیم به:

استادان صبور و مهربانم، جناب آقای دکتر محمد مهدوی و جناب آقای دکتر سید محمد متولی  
که صبورانه مرا تحمل کردند.

## چکیده:

واکنش همجوشی هسته های سبک یکی از راه های تولید انرژی است. همجوشی هسته ای از نظر زیست محیطی نسبت به فرایند شکافت از اینکه باعث آلودگی محیط نمی شود دارای برتری می باشد. آهنگ واکنش پذیری یون ها (هسته ها) یکی از پارامترهای مهم در مطالعه ی فرایند واکنش همجوشی می باشد. در این تحقیق ابتدا معادله شرودینگر با در نظر گرفتن پتانسیل هسته ای به عنوان پتانسیل اختلالی به روش تقریب ونتزل – بریلوئن – کرامرز حل شده، سپس سطح مقطع واکنش و آهنگ واکنش پذیری برای واکنش های هسته هایی همچون  $D-D$  ،  $D-T$  ،  $D-^3He$  ،  $P-^7Li$  ،  $D-^9Be$  ،  $P-^9Be$  و  $P-^{12}C$  به کمک مدل اپتیکی محاسبه شده است. در پایان نتایج محاسبه شده با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است.

## واژه های کلیدی

واکنش هسته ای، تقریب ونتزل – بریلوئن – کرامرز، سطح مقطع واکنش، واکنش پذیری

## فهرست مطالب:

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه ای بر فیزیک هسته ای

۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ ابعاد و جرم هسته ها.....
۳	۳-۱ انرژی بستگی.....
۵	۴-۱ برهم کنش موثر نوکلئون - نوکلئون.....
۷	۵-۱ مدل اپتیکی.....
۹	۱-۵-۱ مدل اپتیکی پدیدارنگر.....
۱۰	۲-۵-۱ پتانسیل اپتیکی میکروسکوپی.....
۱۱	۶-۱ پراکندگی هسته ای.....
۱۲	۷-۱ بحث کیفی سطح مقطع های نوترون.....
۱۴	۸-۱ تحلیل پاره موجی.....

## فصل دوم: فیزیک واکنش های همجوشی

- ۱-۲ مقدمه..... ۱۸
- ۲-۲ تعدادی از واکنش های همجوشی مهم..... ۱۸
- ۱-۲-۲ سوخت های اصلی همجوشی کنترل شده..... ۱۸
- ۲-۲-۲ سوخت های همجوشی پیشرفته..... ۲۰
- ۳-۲-۲ چرخه ی P - P..... ۲۰
- ۴-۲-۲ چرخه ی CNO..... ۲۱
- ۵-۲-۲ چرخه ی CC..... ۲۱
- ۳-۲ سطح مقطع..... ۲۲
- ۴-۲ میانگین واکنش پذیری..... ۲۵
- ۵-۲ میانگین واکنش پذیری با استفاده از تابع توزیع ماکسول بولتزمن..... ۲۶
- ۶-۲ واکنش پذیری واکنش های غیر رزونانس..... ۲۹
- ۷-۲ واکنش پذیری واکنش های رزونانس..... ۳۱
- ۸ - ۲ واکنش پذیری برای سوخت های همجوشی کنترل شده..... ۳۲
- ۹ - ۲ مکانیسم واکنش همجوشی..... ۳۴

۲- ۱۰ واکنش های هسته ای گرمازا : شکافت و همجوشی..... ۳۶

۲- ۱۱ فرایند های بنیادی همجوشی..... ۳۶

### فصل سوم: روشهای تقریبی برای حالت های ایستا

۳-۱ مقدمه..... ۳۹

۳-۲ نظریه ی اختلال مستقل از زمان..... ۳۹

۳-۳ تونل زنی از میان سد پتانسیل..... ۴۲

۳-۴ روش تقریب ونتزل - بریلوئن - کرامرز..... ۴۴

### فصل چهارم: محاسبه آهنگ واکنش همجوشی یون های سبک

۴-۱ مقدمه..... ۴۸

۴-۲ روش تئوری..... ۴۹

۴-۳ محاسبه سطح مقطع و آهنگ واکنش همجوشی..... ۵۹

۴-۵ نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۷۶

منابع..... ۷۹

چکیده انگلیسی..... ۸۳



## فهرست شکل ها و جدول ها:

صفحه	عنوان
۵.....	شکل (۱-۱) نمودار تغییرات انرژی بستگی متوسط بر نوکلئون ( $\frac{B}{A}$ ) بر حسب عدد جرمی.....
۲۴.....	شکل (۱-۲) نمودار سطح مقطع همجوشی برای تعدادی یون های سبک.....
۲۸.....	شکل (۲-۲) میانگین واکنش پذیری بر حسب دما برای تعدادی از واکنش های هسته های سبک.....
۲۹.....	شکل (۳-۲) قله ی انرژی گامو برای واکنش DD در دمای ۱۰ کیلو الکترون ولت.....
۴۳.....	شکل (۱-۳) تونل زنی از میان یک سد پتانسیل.....
۶۱.....	شکل (۱-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش D+T.....
۶۲.....	شکل (۲-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش D+D.....
۶۳.....	شکل (۳-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش D+ <sup>3</sup> He.....
۶۴.....	شکل (۴-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش P+ <sup>7</sup> Li.....
۶۵.....	شکل (۵-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش D+ <sup>9</sup> Be.....
۶۶.....	شکل (۶-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش P+ <sup>9</sup> Be.....
۶۷.....	شکل (۷-۴) مقایسه ی مقادیر آزمایشگاهی با تئوری سطح مقطع همجوشی برای واکنش P+ <sup>12</sup> C.....
۶۹.....	شکل (۸-۴) مقایسه ی مقادیر تئوری با تجربی آهنک واکنش همجوشی برای واکنش D + T.....
۷۰.....	شکل (۹-۴) مقایسه ی مقادیر تئوری با تجربی آهنک واکنش همجوشی برای واکنش D + D.....
۷۱.....	شکل (۱۰-۴) مقایسه ی مقادیر تئوری با تجربی آهنک واکنش همجوشی برای واکنش D + <sup>3</sup> He.....

شکل (۴-۱۱) آهنگ واکنش همجوشی بر حسب دما برای واکنش  $P+{}^7Li$ ..... ۷۲

شکل (۴-۱۲) آهنگ واکنش همجوشی بر حسب دما برای واکنش  $P+{}^9Be$ ..... ۷۳

شکل (۴-۱۳) آهنگ واکنش همجوشی بر حسب دما برای واکنش  $P+{}^{12}C$ ..... ۷۴

شکل (۴-۱۴) آهنگ واکنش همجوشی بر حسب دما برای واکنش  $D+{}^9Be$ ..... ۷۵

شکل (۴-۱۵) نموداری مقایسه ای از آهنگ واکنش همجوشی بر حسب دما برای واکنش های انتخابی..... ۷۷

### فهرست جدول ها:

جدول (۱-۲) مقدار سطح مقطع همجوشی تعدادی از واکنش ها در انرژی های ۱۰ و ۱۰۰ کیلو الکترون ولت..... ۲۳

جدول (۱-۴) پارامترهای پتانسیل اپتیکی بدست آمده برای تعدادی از واکنش های همجوشی یون های سبک..... ۶۰

## فصل اول

مقدمه ای بر فیزیک هسته ای

## ۱-۱) مقدمه

مطالعات تجربی و نظری فیزیک هسته ای نقش برجسته ای در توسعه ی فیزیک قرن بیستم ایفا کرده است. بعلاوه این علم اطلاعاتی در اختیار ما گذاشته است که در زمینه های علمی دیگر، از جمله در فیزیک اتمی و حالت جامد، نیز کاربرد وسیعی پیدا کرده است. فیزیکدانها، امروزه از فنونی که در آزمایشگاه های فیزیک هسته ای آموخته اند برای تشخیص و درمان بیماریها در اعماق بدن انسان، بدون اینکه نیازی به جراحی باشد، بهره برداری می کنند. اما از سوی دیگر هم برخی از فنون فیزیک هسته ای تجربی در ساختن سلاح های وحشتناک مورد استفاده قرار می گیرند. آسان نیست که هیچ علم دیگری را با این علم که طیف گسترده ای از کوچکترین ذرات میکروسکوپی تا موجودات کیهانی را شامل می شود، مقایسه کنیم. فیزیک هسته ای از چنان صورت بندی نظری منسجمی برخوردار نیست که با استفاده از آن بتوانیم تمام پدیده ها را به روشی بنیادی تحلیل و تعبیر کنیم [۱].

## ۱-۲) ابعاد و جرم هسته ها

ابعاد هسته ها خیلی کوچکتر از ابعاد اتم ها است. به عنوان نمونه با توجه به اینکه اتم هیدروژن شعاع تقریبی  $5 \times 10^{-9}$  سانتی متر دارد، اما هسته ی آن دارای شعاع تقریبی  $10^{-13}$  سانتی متر می باشد. به دلیل اینکه وزن پروتون بسیار بزرگتر از الکترون است، هسته بسیار چگال می باشد. با استفاده از مدل قطره مایعی، شعاع هسته را به صورت زیر می توان تعریف کرد:

$$R(\text{cm}) = 1.4 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \quad (1-1)$$

A در این رابطه عدد جرمی هسته می باشد. در محدوده ی اعداد جرمی تقریباً ۱ تا ۲۵۰ می بینیم که شعاع همه ی هسته ها از  $10^{-12}$  سانتی متر کوچک تر است. جرم اتم ها بر حسب جرم اتمی کربن ۱۲ تعریف می شود. به عنوان مثال جرم اتمی  $^1_1\text{H}$  برابر  $1/0.07825$  و  $^2_1\text{H}$  برابر  $2/0.14102$  می باشد. جرم اتمی پروتون برابر  $1/0.07276$  می باشد و با جرم اتمی نوترون که برابر  $1/0.08665$  است، فقط ۰/۱ درصد اختلاف دارد [۲]. واحد جرم اتمی (amu)، بر حسب  $\frac{1}{12}$  جرم اتمی کربن ۱۲ متناظر با جرم واقعی  $^{-24}$   $1.660539 \times 10^{-24}$  گرم می باشد. این مقدار به عکس مقدار عدد آووگادرو نزدیک است. با ضرب جرم در جرم واحد اتمی، جرم دقیق اتم ها را می توانیم محاسبه کنیم. برای مثال جرم دقیق نوترون به صورت زیر بدست می آید:

$$m_n = (1.008665)(1.660539) = 1.674928 \times 10^{-24} \text{g} \quad (2-1)$$

### ۳-۱) انرژی بستگی<sup>۱</sup>

مقدار انرژی ای که نوکلئون های یک هسته را در کنار هم قرار می دهد، انرژی بستگی نامیده می شود [۳]. اساسی ترین مشخصه ی هسته های اتمی، جرم می باشد. اندازه گیری های اولیه نشان دادند که جرم هسته ای کل ( $m_{\text{nuc}}$ )، کوچکتر از مجموع جرم نوکلئون های سازنده ی آن است [۴]. اختلاف جرم یک هسته با جرم  $m$  که دارای  $Z$  پروتون و  $A - Z$  نوترون می باشد، برابر است با:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \quad (3-1)$$

در این رابطه،  $m_p$  بیانگر جرم پروتون و  $m_n$  جرم نوترون می باشد.

برای یک هسته ی پایدار مقدار  $\Delta m$  مثبت است و این اختلاف جرم، مطابق رابطه ی جرم-انرژی اینشتین<sup>۱</sup> ، انرژی بستگی را بوجود می آورد که برابر است با:

$$B = \Delta m C^2 \quad (۴-۱)$$

واکنش های هسته ای گرمازا را می توان به صورت اختلاف انرژی بستگی هسته ها تعریف کرد. در نتیجه Q یک واکنش هسته ای را می توان به صورت اختلاف انرژی بستگی هسته های نهایی و اولیه به صورت زیر نوشت:

$$Q = \sum_f B_f - \sum_i B_i \quad (۵-۱)$$

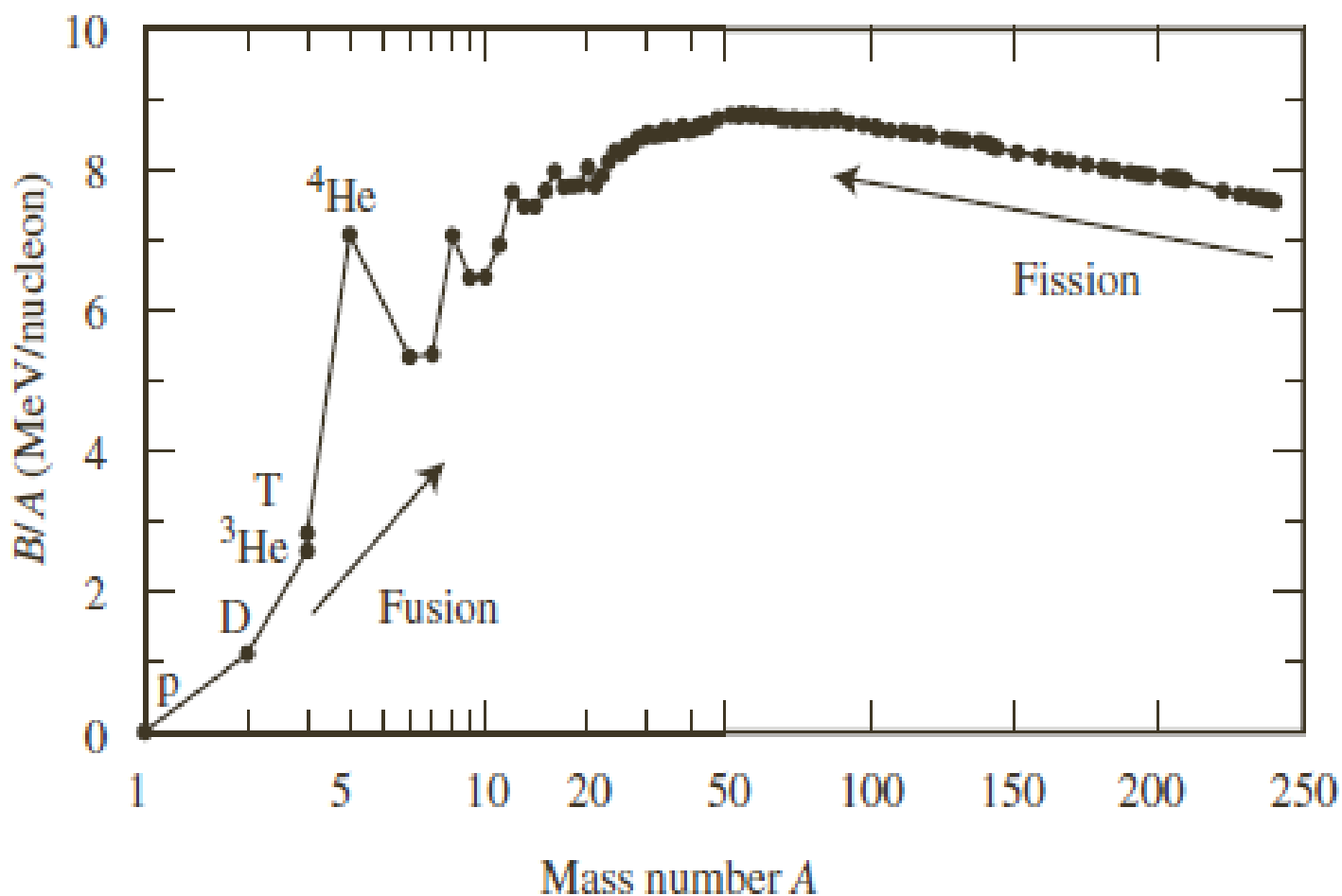
یکی از کمیت های مهم، انرژی بستگی متوسط بر نوکلئون ( $\frac{B}{A}$ ) است که در شکل (۱-۱) به صورت تابعی بر حسب عدد جرمی A برای هسته های مختلف رسم شده است. مشاهده می شود که نمودار  $\frac{B}{A}$  با افزایش A تا یک ناحیه ی پهن با  $A=۵۶$  به اندازه ی  $۸/۷$  مگا الکترون ولت افزایش یافته و از آن به بعد به کندی کاهش می یابد. برای سنگین ترین هسته ها این مقدار برابر  $۷/۵$  مگا الکترون ولت می باشد. مطابق آنچه در بالا ذکر شد، واکنش های هسته ای گرمازا زمانی رخ می دهند که انرژی بستگی متوسط محصولات واکنش از انرژی بستگی متوسط هسته های واکنش کننده بزرگتر باشد. همانطور که از شکل (۱-۱) پیداست، این امر توسط شکافت هسته های سنگین و همجوشی هسته های سبک امکان پذیر می باشد [۵].

شکافت هسته ای<sup>۲</sup>: فرایندی است که طی آن یک هسته ی سنگین به دو نوکلئید سبک شکافته می شود. همجوشی هسته ای<sup>۳</sup>: در اغلب واکنش های همجوشی دو هسته ی سبک با هم ترکیب شده و یک هسته ی سنگین تر به همراه یک ذره ی سبک تر تشکیل می شود.

---

1. Einstein  
2. Nuclear Fission  
3. Nuclear Fusion

در مرحله اول این واکنش ها بصورت کنترل شده برای تولید جریان برق استفاده می شوند. مقدار انرژی تولید شده به ازای هر نوکلئون در فرایند همجوشی هسته ای، ۸ برابر انرژی تولید شده به ازای هر نوکلئون در شکافت هسته ای می باشد. منشا انرژی تابشی خورشید و دیگر ستاره ها یک سری از همین واکنش های هسته ای انرژی زا می باشد.



شکل (۱-۱) نمودار تغییرات انرژی بستگی متوسط بر نوکلئون ( $\frac{B}{A}$ ) بر حسب عدد جرمی [۶].

#### ۴-۱) برهم کنش موثر نوکلئون - نوکلئون

اجزاء اصلی هسته (پروتون ها و نوترون ها) وقتی در کنار هم قرار می گیرند، یک دستگاه کم و بیش پایدار را تشکیل می دهند.

برهم کنش موثر بین نوکلئون ها (پروتون ها و نوترون ها) شامل بر هم کنش پروتون با پروتون، پروتون با نوترون و نوترون با نوترون می باشد که هر یک را به اختصار توضیح می دهیم. نخست نیروی بین دو پروتون را در نظر می گیریم. برای بررسی این نیرو یک پروتون تک انرژی را که بوسیله یک شتابدهنده تولید شده است به سمت یک هدف شامل پروتون که اغلب اتم های هیدروژن می باشند، پرتاب می کنیم. با استفاده از توزیع زاویه ای ذرات پراکنده شده، به نیرویی که بین ذرات فرودی و هدف وجود دارد می توان پی برد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان می دهد که در فواصل کمتر از تقریباً ۳ فرمی یک تغییر نسبتاً تیزی در پتانسیل ایجاد می گردد که نشان دهنده محدوده وارد شدن نیروی هسته ای می باشد. وقتی فاصله بین پروتون ها از این مقدار بیشتر باشد، با یک نیروی عکس مجذوری همدیگر را دفع می کنند [۷].

وسیله متداول تولید نوترونها، چشمه ی رادیوم- برلیوم است که به واکنش  ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$  وابسته است. ذرات  $\alpha$  حاصل از رادیومی که با پرتوایی واپاشیده می شوند، با برلیوم که در رادیوم مخلوط است برخورد می کنند و نوترونها با گستره وسیعی از انرژی گسیل می شوند.

از واکنش فروپاشی فوتونی نیز می توان به عنوان چشمه ای از نوترونها استفاده کرد. بهترین چشمه ی شار بزرگ نوترونی راکتور هسته ای می باشد که براساس شکافت هسته ای عمل می کند. به همین طریق نیز می توان نیروی بین نوترون و پروتون را تحقیق کرد. در این آزمایش یک باریکه تک انرژی شامل نوترون، هدفی شامل پروتون ها را بمباران می کند. وقتی فاصله بین دو ذره زیاد است، هیچ نیرویی بین آنها وجود ندارد. اما در فاصله حدود دو فرمی، نوترون و پروتون توسط یک نیروی هسته ای شدید همدیگر را جذب می کنند. نیروی هسته ای بین دو نوترون به طور مستقیم و با انجام آزمایش پراکندگی قابل تحقیق نیست. اما شواهدی وجود دارد که نشان می دهد این نیرو با نیروی پروتون - نوترون و زوج پروتون برابر است.



## ۵-۱) مدل اپتیکی<sup>۱</sup>

این مدل پایه و اساسی را برای تحلیل تئوری و ارزیابی سطح مقطع واکنش که در تولید داده های هسته ای با هدف کاربردی مورد استفاده قرار می گیرد، فراهم می کند [۸]. پتانسیل استفاده شده براساس این مدل، پتانسیل اپتیکی<sup>۲</sup> نامیده می شود. این پتانسیل برهم کنش موثر دو ذره ای است که مرکز جرم هایشان در فاصله  $r$  نسبت به هم قرار دارند [۹]. برای توصیف واکنش هسته ای بین هسته های  $A_1$  و  $A_2$ ، معادله شرودینگر باید برای هر یک از نوکلئون های سیستم نوشته شود. هریک از نوکلئون های هسته در چاه پتانسیلی قرار دارد که توسط نوکلئون های دیگر ایجاد می شود. بنابراین ما سیستمی از  $N$  معادله خواهیم داشت که از لحاظ عددی حل آنها ناممکن بوده و ضروری است که شیوه های دیگری را برای حل این مسئله  $N$  بعدی پیدا کنیم. در فرم مدل اپتیکی، همه برهم کنش های بین نوکلئون های پرتابه و هدف با یک برهم کنش مرکزی و میانگین  $V(r)$  در حالت های پایه جایگزین می شود [۱۰]. این مسئله حل معادله ی شرودینگر را با جایگزین کردن مسئله یک بعدی به جای  $N$  بعدی به صورت زیر ساده می کند: یک ذره به جرم  $\mu$  (جرم کاهش یافته ی سیستم) در یک چاه پتانسیل  $V(r)$  که جایگزین همه ی برهم کنش های بین نوکلئون های مختلف می شود. در نتیجه معادله ای که باید حل شود به صورت زیر می باشد:

$$H\psi = \left[ -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V \right] \psi = E\psi \quad (۶-۱)$$

$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$  جرم کاهش یافته سیستم و  $r$  فاصله بین دو هسته می باشد. پتانسیل استفاده شده در این مدل، برهم کنش بین هسته ها را توصیف می کند که یک عبارت مختلط است. هر دو قسمت حقیقی و موهومی این پتانسیل وابسته به انرژی هستند. در انرژی های پایین، قسمت حقیقی این پتانسیل مشابه پتانسیل استفاده شده در مدل پوسته ای بوده و قسمت موهومی با موج ذرات فرودی برهم کنش کرده و تقلیل می یابد.

---

1. Optical Model  
2. Optical Potential

این مدل نقطه‌ی آغازی برای محاسبات مدل هسته‌ای می‌باشد که مهمترین اطلاعات را در زمینه‌ی طیف‌نمایی، شکل هسته‌ای و ساختار آن در اختیار ما قرار می‌دهد. اهمیت این مدل با کاهش جهانی تسهیلات آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری‌های فیزیک هسته‌ای در انرژی‌های پایین و به تبع آن افزایش تکیه بر شیوه‌های تئوری برای فراهم کردن داده‌های هسته‌ای، بیشتر آشکار می‌شود [۱۱]. این مدل برای توصیف سطح مقطع غیرکشسان و توزیع زاویه‌ای پراکندگی کشسان به کار برده می‌شود [۱۲]. قسمت اصلی این مدل، پتانسیل آن می‌باشد که نقشی ضروری در توصیف تعدادی از واکنش‌های هسته‌ای به عنوان مثال فرایندهای پراکندگی ناکشسان، انتقال یا واکنش‌های مستقیم و مطالعات ساختار هسته‌ای دارد [۱۳]. ساده‌ترین فرم برای این پتانسیل، پتانسیل ساده‌ی چاه مربعی می‌باشد:

$$V(r) = -V_0 - iW_0 \quad (7-1)$$

این پتانسیل، سطح مقطع خیلی بزرگی را برای پراکندگی کشسان بدست می‌دهد. همچنین این پتانسیل هسته‌ای متوسط در صورتی که  $U_0$  و  $W_0$  تابعی از  $r$  باشند، می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$V(r) = U(r) + iW(r) \quad (8-1)$$

$U(r)$  قسمت حقیقی این پتانسیل است که پراکندگی کشسان یعنی یک بازتاب از موج فرودی را نشان می‌دهد.  $W(r)$  قسمت موهومی این پتانسیل است که اتلاف شار ناشی از برخوردهای غیرکشسان را شبیه‌سازی می‌کند. برهم‌کنش موج فرودی با قسمت حقیقی این پتانسیل منجر به پراکندگی کشسان شده و قسمت موهومی مربوط به اثرات جذبی هسته‌ای می‌باشد.

## ۱-۵-۱) مدل اپتیکی پدیدارنگر

در ابتدا پتانسیل های اپتیکی برای برهم کنش نوترون ها با هسته ها و بعد از آن برای پراکندگی پروتون ها، ذرات  $\alpha$  و یون های سنگین بیان شدند. شکل کلی پتانسیل اپتیکی به صورت زیر می باشد:

$$V(r) = U f(r) + i W g(r) \quad (۹-۱)$$

$U$  و  $W$  به ترتیب عمق چاه پتانسیل برای قسمت های حقیقی و موهومی می باشند. تابع های  $f(r)$  و  $g(r)$  وابسته به فاصله بین دو هسته می باشند. برهم کنش نوکلئون-نوکلئون یک برهم کنش کوتاه برد است. پتانسیل  $U f(r)$  که تقریباً جمع برهم کنش نوکلئون-نوکلئون است، رفتاری مشابه دارد. به علت اشباع نیروهای هسته ای،  $U f(r)$  در درون هسته تقریباً یکنواخت بوده و در سطح هسته کاهش پیدا می کند. تغییرات قسمت حقیقی پتانسیل برهم کنشی، با یک تابع وود-ساکسون به صورت زیر نشان داده می شود:

$$f(r) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)} \quad (۱۰-۱)$$

$R$  مطابق با شعاع هسته بوده و پارامتر  $a$  برای پراکندگی سطح هسته ای مطرح شده است. تابع مربوط به قسمت موهومی، وابسته به انرژی است. در انرژی پایین (پایین تر از ۱۰ مگا الکترون ولت) جذب در سطح هسته وجود دارد. در این مورد تابع  $g(r)$  به صورت مشتق تابع وود-ساکسون در سطح هسته بیان می شود.

$$g(r) = 4 a \frac{\partial f(r)}{\partial r} \quad (۱۱-۱)$$

در انرژی های بالاتر، قسمت موهومی شامل دو عبارت می باشد. یک عبارت سطحی که توسط تابع  $g(r)$  توصیف می شود و یک عبارت حجمی که با پتانسیل وود-ساکسون توصیف می شود. برای هسته های تغییر شکل یافته که تقارن کروی ندارند، پتانسیل اپتیکی باید بر حسب عبارت هایی اصلاح شده باشد. این عبارت ها انحراف هسته را از حالت کروی نشان می دهند.

بنابراین این پتانسیل معمولاً شامل یک عبارت اسپین - مدار می باشد که تغییر در موقعیت های اسپین به واسطه ی جفت شدگی اسپین و تکانه ی زاویه ای را توصیف می کند. این عبارت برای محاسبه برهم کنش بین اسپین نوکلئون ( S ) با تکانه ی زاویه ای ( L ) آن به صورت زیر مطرح می شود:

$$V_{so}(r) \propto \frac{1}{r} \frac{df(r)}{dr} l.s \quad (12-1)$$

چنانچه ذره فرودی باردار باشد، یک پتانسیل کولنی  $V_c(r)$  نیز به پتانسیل  $V(r)$  اضافه می شود. این پتانسیل توسط یک بار نقطه ای  $Z_{A1}$  و کره به طور یکنواخت باردار شده با بار  $Z_{A2}$  و شعاع  $R$  ایجاد می شود. مجموع شعاع پرتابه و هدف می باشد.

برای بدست آوردن پارامترهای بهتر و انحراف کمتر مقادیر آزمایشگاهی از مقادیر تئوری، جمله مربوط به برهم کنش کولنی و اثرهای جذبی سطحی و جذبی حجمی را نیز می توان به این پتانسیل اضافه کرد. با در نظر گرفتن همه این سهم ها، پتانسیل مختلط استفاده شده در مدل اپتیکی به صورت زیر می باشد:

$$V(r) = V_c(r) + U f(r) + i W_v f(r) + i W_s g(r) + V_{so}(r) \quad (13-1)$$

برای بدست آوردن سطح مقطع همجوشی هسته های سبک، جمله های مربوط به اثرهای جذبی سطحی و جذبی حجمی به دلیل کوچک بودن سطح هسته ای نادیده گرفته می شوند.

## ۱-۵-۲) پتانسیل اپتیکی میکروسکوپی

پتانسیل برهم کنشی هسته- هسته می تواند به صورت میکروسکوپی به عنوان مثال با استفاده از مدل فولدینگ<sup>۱</sup> تعیین شود. این مدل به طور وسیعی برای محاسبه پتانسیل برهم کنشی هسته - هسته و نوکلئون- هسته موفق بوده است [۱۴].