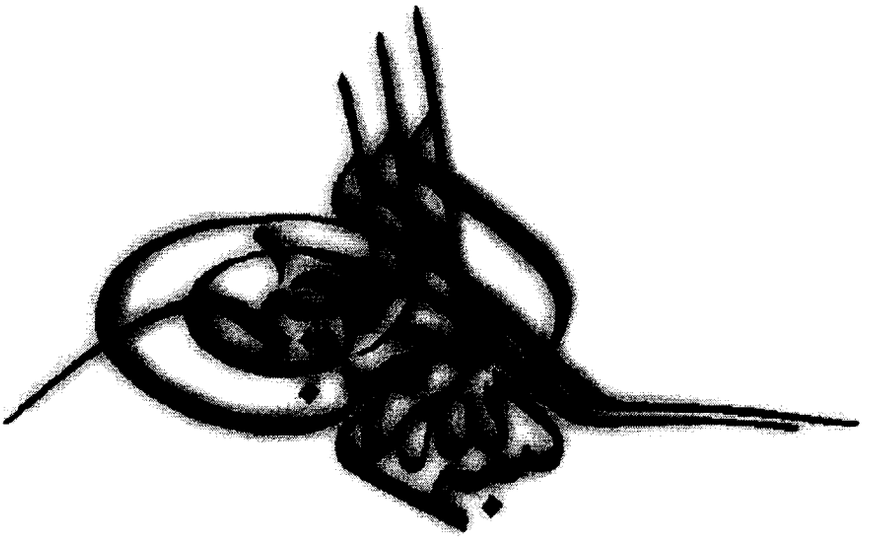


٢٠١٤م

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

۱۳۸۲ /۷/ ۲۰

حل چرخه همجوشی کاتالیزور میونی با استفاده از روش مونت کارلو

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

مریم رجایی نجف آبادی

استاد راهنما

دکترسید ظفر الله کلانتری

اسفند ۱۳۸۱

۹۲۴۱۵

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد خانم مریم رجایی نجف آبادی

تحت عنوان

حل چرخه همجوشی کاتالیزور میونی با استفاده از روش مونت کارلو

در تاریخ ۱۳۸۱/۱۲ /۲۴ توسط کمیتهٔ تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر سید ظفر الله کلانتری
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر احمد شیرانی
۳- استاد داور	دکتر مصطفی زاهدی فر
۴- استاد داور	دکتر اکبر پروازیان
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر منصور حقیقت

تشکر و قدر دانی

اینک که به فضل خداوند این تحقیق به صورت پایان نامه قرار گرفت، لازم مـی دانـم از جنـاب آقـای دکتر کلانتری، استاد محترم راهنمای پایان نامه به خاطرزحمات فراوان در طـی دو سـال گذشـته کمـال تشکر و سپاس راابراز نمایم.

همچنین از آقای دکتر احمد شـیرانی، اسـتاد محـترم مشـاور در ایـن پایـان نامـه بـه خـاطر راهنماییـهای ارزشمند و مطالعه و ویراستاری این پایان نامه سپاسگذاری می نمایم.

از آقای دکتر اکبر پروازیان،استاد محترم داور به خـاطر ارائـه رهنمودهـای ارزشـمند سپاسـگذاری مـی نمایم.

همچنین از آقای دکتر منصور حقیقت، سرپرست محترم تحصیلات تکمیلی دانشـکده بـه خـاطر فراهـم کردن تسهیلات و امکانات مورد نیاز قدردانی می نمایم.

در پایان از تمام کسانی که در تمام مراحل مختلف انجام این تحقیق اینجـانب را یـاری نمودنـد، کمـال تشکر و سپاس را دارم.

مریم رجایی

اسفند

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به ستاره های آسمان

زندگیم: پدر و مادر عزیزم و

همسر مهربانم

عنوان	فهرست مطالب	صفحه

فهرست مطالب هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

فصل دوم:همجوشی کاتالیزور میونی ۹

۲-۱- مسیر جانبی ۱۶

۲-۲- بهره انرژی و عوامل مؤثر در آن ۱۷

فصل سوم:سینماتیک همجوشی در مخلوط D/T ۲۴

۳-۱- معادلات سینماتیک چرخه ها و روش حل آنها

فصل چهارم:استفاده از روش مونت کارلودر شبیه سازی چرخه μCF ۳۴

۴-۱- نمونه گیری از یک تابع چگالی احتمال ۳۵

۴-۲- فرآیند برخورد اتمهای میوندار در مخلوطی از ایزوتوپهای هیدروژن ۳۶

۴-۳- سطح مقطع برخورد اتمهای $t\mu$ ۳۷

۴-۴- تعیین انرژی میو اتمهای سریع در طول زمان ۴۳

۴-۴-۱- زمان برخورد ۴۴

۴-۴-۲- انتخاب حالتهای تصادفی بر اساس دینامیک برخورد اتمهای میوندار ۴۵

فصل پنجم:نتایج و پیشنهادات ۴۹

پیوست ۶۱

مراجع ۹۳

چکیده

انرژی هسته ای از انرژیهای مورد توجه بشر بـه حسـاب مـی آیـد و بـه دو روش شـکافت و همجوشـی حاصل می شود. همجوشی هسـته ای از اهمیـت خـاصی برخـوردار اسـت. منـا سـبترین سـوخت بـرای همجوشی، مخلوط ایزوتوپهای دوتریوم و تریتیوم است .یکی از روشهای مطرح در همجوشی هسته ای استفاده از روش کاتالیزور میونی است. روشهای مختلفی برای بدست آوردن آهنگ چرخـه و بررسـی عوامل مختلف روی بهره همجوشی ارائه شده است. یک روش مناسب برای بررسی چرخه μ cF حل معادلات سینماتیکی چرخه است که روش کاملا دقیقی نیست. در این کـار تحقیقـاتی مـا بـه دنبـال آن هستیم که تمام فرآیندهای چرخه μcF را بطور دقیـق شـبیه سـازی کنیـم. بـرای ایـن منظـور از روش مونت کارلو استفاده شده است. در این روش با استفاده از نسبت سطوح مقطع واکنشهای مختلـف، مـی توان احتمال انجام واکنشها را در برخوردهای مختلف بدست آورد و با تولید اعـداد تصـادفی بـه روش آماری مسئله را حل کرد. برای یک ذره آنچه قبل از هر چیز به آن نیاز است، انرژی اولیه است کـه بـه صورت ماکسولی در نظر گرفته شده اسـت. در شـبیه سـازی برخوردهـا نیـاز بـه محاسـبه زمـان بیـن دو برخورد متوالی است که در این تحقیق محاسبه می شود. همچنین انرژی بعـد از برخـورد محاسـبه شـده است. در کار حاضر کد کامپیوتری براساس روش مونت کارلو و به زبان فرترن تهیه شـده اسـت.نتـایج بدست آمده برای تعداد همجوشیهای کاتالیز شده به ازای یک میـون بـا روشـهای محاسـبهٔ قبلـی مـورد مقایسه قرار گرفته است با توجه به اینکه این روش نسبت بـه حـل سـینماتیک چرخـه از دقـت بـالاتری برخوردار است، نتایج بهرهٔ همجوشی تصحیح شده است. علاوه بـر ایـن اطلاعـات مفیـد دیگـری مثـل تعداد برخوردهای مختلفی که اتمهای میوندار در طی چرخه به طور متوسط انجام می دهنداز این روش قابل محاسبه است که از روشهای دیگر بدست نمی آید. در نـهایت تعـداد متوسـط انـواع برخوردهـای اتمهای میوندار در شرایط مختلف غلظت ایزوتوپهای هیدروژن ارائه و نتیجه گیری انجام شده است.

فصل اول
مقدمه

امروزه مبحث انرژی های نو در علوم و تکنولوژی به طور جدی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از انرژی خورشیدی جهت تولید الکتریسیته، استفاده از حرارت زمین در اعماق زیاد و ... نمونه هایی از انرژی های نو هستند. این انرژی ها دارای دو خصوصیت اصلی تمیزی و فراوانی می‌باشند. دربین منابع جدیدی که مورد توجه قرار گرفته اند انرژی حاصل از همجوشی و شکافت از جایگاه ویژه ای برخوردار است. تامین انرژی از طریق شکافت هسته ای مشکلاتی به همراه دارد از آن جمله منابع محدود اورانیوم، مسئله سازبودن پسماندهای سوخت این راکتورها که بسیار رادیواکتیو هستند ودارای طول عمر زیادی می باشند، نگهداری آنها و اینکه در حادثه های احتمالی، نشت این پسماندهای خطرناک لطمات جبران ناپذیری می تواند به سلامت انسانها و محیط زیست واردکند و در نهایت قابل کنترل نبودن راکتور های شکافت بعد از وقوع حادثه مواردی هستندکه می توان نام برد [۱]. مزیت همجوشی هسته ای در این است که اولا منابع سوخت آن بسیار فراوان و قابل دسترس هستند، به عنوان نمونه یکی از معروفترین سوختهای همجوشی مخلوط دو تریوم و تریتیوم است. ثانیا معضل پسماندهای هسته ای ندارد و محصولات واکنش همجوشی غیر رادیواکتیو هستند وسوم اینکه در هنگام وقوع حادثه های احتمالی، ماهیت این راکتورها به گونه ای است که برخلاف راکتورهای شکافت از کنترل خارج نمی شوند.

در فرآیند همجوشی هسته ای، هسته های سبک مانند ایزوتوپهای هیدروژن بایکدیگر ترکیب شده و یک هسته سنگین تر همراه با محصولات دیگر واکنش نظیر تابش‌ها و نوکلئونها تولید می شود که مجموعاً جرم آنها اندکی از جرم هسته‌های اولیه کمتر است. جرم از دست رفته به انرژی تبدیل و به ذرات حاصل از همجوشی منتقل می‌شود.

از میان واکنشها یی که در همجوشی به وقوع می پیوندند برهم‌کنشهای زیر از اهمیت بیشتری برخوردار هستند.

$$D + T \rightarrow n + {}^4He + 17.6MeV \qquad (۱_۱)$$

$$D + D \rightarrow \begin{cases} n + {}^3He + 4 \quad MeV \\ p + T + 3.25 \quad MeV \end{cases} \qquad (۲_۱)$$

$$T + T \rightarrow {}^4He + 2n \qquad (۳_۱)$$

$$D + {}^3He \rightarrow {}^4He + p \qquad (٤_۱)$$

$$p + D \rightarrow {}^3He + \gamma \qquad (٥_۱)$$

$$p + T \rightarrow {}^3He + n \qquad (٦_۱)$$

ازمیان واکنشهای فوق واکنش (۱-۱) بیشترین سطح مقطع را دارد که حدود صد برابر سطح مقطع بقیه واکنشهای ذکر شده است. همچنین دو تریوم به مقدار ۲۸ گرم در تن در آب اقیانوسها وجود دارد و به مدت طولانی می تواند پاسخگوی نیاز مصرفی باشد [۲] وتریتیوم نیز از برهم کنش نوترون با لیتیوم در پوشش راکتورهای همجوشی وشکافت بدست می آید [۳]. علاوه براین، تریتیوم یکی ازمحصولات بعضی از واکنشهای همجوشی هسته ای مثل $d(d,t)p$ است.

در فرآیند همجوشی، هسته های همجوشی کننده دارای بارمثبت هستند، در حقیقت مانع سد کولنی یکی از مهمترین مشکلات اصلی در ساخت راکتورهای همجوشی است. برای رفع این مشکل دو راه کلی پیشنهاد شده است:

الف - همجوشی گرم یا گداخت هسته ای

ب - همجوشی کاتالیزور میونی

گداخت هسته ای به دو صورت محصور سازی مغناطیسی (M C F)[1]و محصور سازی به روش لختی (ICF)[2] صورت می پذیرد. در روش محصور سازی مغناطیسی سوخت به حالت پلاسما تحت کنترل میدانهای مغناطیسی قوی در می‌آید و سپس با روشهای خاصی دمای پلاسما به حدود صد میلیون درجه کلوین می رسد و این دمایی است که برای سوخت شرایط انجام همجوشی فراهم است. با توجه به مسائلی از قبیل ناپایداریها ی پلاسما و تابشهای مختلف که موجب سرد شدن پلاسما می شود، شرایط بحرانی مورد نظر در یک زمان کوتاه قابل دسترسی است. این مسئله از جمله مشکلات اصلی در استفاده از روش فشردگی مغناطیسی به حساب می آید [۲]. در روش فشردگی لختی، سوخت درمرکز یک ساچمه به شعاع کسری از میلیمتر و با دیواره چند لایه ای قرار می‌گیرد. این ساچمه توسط شار متقارنی از پرتولیزر پر انرژی در یک لحظه کوتاه بمباران می شود. ساختار ویژه لایه های بیرونی ساچمه باعث انتقال انرژی این تابشها به داخل ساچمه شده و فشارسوخت را در یک لحظه کوتاه تا $۱۰^{۱۳}$ پاسکال افزایش می دهد. در این لحظه دما و فشار سوخت به حد بحرانی برای انجام همجوشی می‌رسد و مقداری ازسوخت، همجوشی انجام می دهد. پس ازانفجار، این روند مجددا با ساچمه های بعدی تکرار می شود. در این روش به دلیل ایجاد شرایط فیزیکی بسیارمتفاوت با محیط اطراف، مانند دما و فشار بسیار بالا، سوخت ناپایدار بوده و شرایط بحرانی برای انجام همجوشی تنها برای لحظه ای کوتاه قابل دسترسی است [۳]. در جدول زیر مقایسه ای ازاین دو روش به عمل آمده است.

جدول ۱-۱ مقایسه شرایط فیزیکی در M CF و ICF [۴]

Magnetic Confinement	Inertial confinement
$T \cong ۱۰^{۸}$ K $\tau \cong ۱$ S $\rho \cong ۱۰^{-۸}$ LHD	$p \cong ۱۰^{۹}$ atom $\tau \cong ۱۰^{-۱۲}$ S $\rho \cong ۱۰^{۳}$ LHD

ب- همجوشی کاتالیزور میونی (μ CF)[3]

همجوشی کاتالیزشده توسط میون اولین بار درسال ۱۹۴۸ توسط فرانک[4] مشاهده شد [۵].

---

[1] Magnetic confinement fusion

[2] Inertial confinement fusion

[3] Muon catalyzed fusion

[4] F.C .Frank

وی که روی تابشهای کیهانی در بریستول[۵] انگلستان تحقیق می کرد به هنگام مطالعه تصاویر بـه دسـت آمـده ازمسیرهای داخل امولسیون هسته ای شامل هیدروژن مایع، متوجه انجام این واکنش شد. او متوجه شد که ذره بارداری که وارد محیط شده است متوقف شده و سپس ذره بارداری از اطراف محل توقف با انـرژی زیـادی خارج شده است. از آنجاییکه مطالعات در مورد امکان واپاشی پـایون بـه میـون انجـام مـی گرفـت بـه منظـور بررسی موارد دیگر فرانک حدس زد که یک پایون منفی (π^-) با جذب شدن توسط یک پروتون، یک اتـم پایوندار با شعاع اتمی ۲۴۰ برابر کوچکتر از اتم الکترونداز تولید می کند. این اتـم بـا یـک دوتـرون برخـورد کرده و مولکول پایوندار $pd\pi$ را تولید می کند. به علت کوچکی ابر پایونی، دو هسته مولکول آنقدر به هـم نزدیک می‌شوند که همجوشی هسته ای رخ داده و هسته α تولید می کند، در نهایت پایون با انـرژی زیـادی که از همجوشی کسب کرده است دو باره آزاد می شود.

$$p\pi + d \rightarrow pd\pi \rightarrow {}^{3}He + \pi \qquad (۷-۱)$$

پس از آن همکاران اوساخاروف[۶] و زلدویچ[۷] دریک کـار نظـری روی همجوشـی کاتـالیز شـده توسـط میـون برآوردهایی از میزان انجام این واکنشها انجام دادند [۶]. اولین آزمایش همجوشـی کاتـالیزور میونـی درسـال ۱۹۵۶ توسط آلوارز[۸] ودیگران دراطاقک حاوی هیدروژن در برکلی[۹] انجام شـد[۷]. دراین آ زمـایش اولیـن مشاهدات و اندازه گیریهای منظـم از μcF انجـا م شـد و در آن از مخلـوط سـوخت $P-P$ اسـتفاده شـد. برآوردهای نظری در سال ۱۹۵۷ توسط جکسون [۱۰] و زلدویچ وساخاروف نشان داد که تعداد همجوشـی های کاتالیز شده مورد انتظار توسط میون در طـــول عمـــر آن (s $۲/۱۹\times۱۰^{-۶}$) ۱ یـا ۲ همجوشـی اسـت و نتیجه گرفتند که نمی توان از این روش به عنوان منبع تولید انرژی استفاده کرد. بعـد از مطرح شـدن تشـکیل مولکول کمپلکس میوندار به صورت تشدیدی، یک سری از مطالعـات و محاسـبات نظـری وعـددی توسـط گروه محققین روسی انجام شد و در سال ۱۹۷۷ نشان دادند که مولکول $dt\mu$ بـه صـورت تشـدیدی بـا بـهره بالایی تولید می شود و می تواند بهره همجوشی را تا ۱۰۰برابر افزایش دهد [۸].

از آن به بعد بود که علاقه نسبت به روش کاتالیزور میونـی افزایـش یـافت و امـروزه در دنیـا آزمایشـگاههای متعددی جهت بررسی جنبه های مختلف μCF درحال تحقیق هستند.

---

[۵] Bristol

[۶] A.D.Sakharov

[۷] I.A.Zelddovich

[۸] L.W.Alvarez

[۹] Berkeley

[۱۰] J.D.Jackson

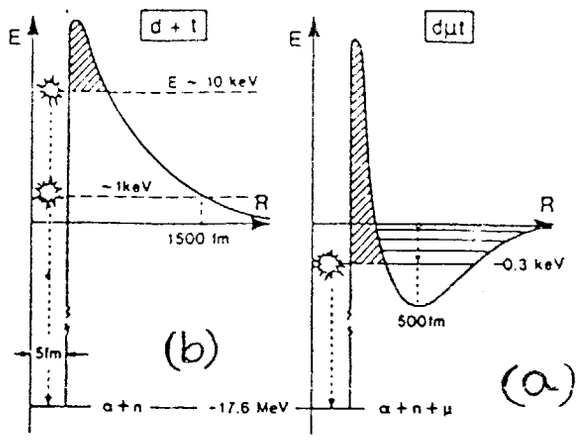
محاسبات بهره انرژی با توجه به امکانات موجود برای یک راکتور، نشان می دهد که برای بـه دسـت آوردن بهره مثبت از واکنشها، بهره همجوشی باید بیش از ۱۰۰۰ همجوشی به ازای یک میون باشد [۹].
اولین گام برای افزایش بهره واکنشها، شناخت کامل پدیده‌ها وسازوکارهای انتقال جمعیت میون بین حـالات مختلف فیزیکی می باشد که در فصل بعد به این موضوع پرداخته می شود.
میون یکی از ذرات بنیادی در طبیعت است واز خانواده لپتونها اسـت. ایـن ذره را مـی تـوان از واپاشـی پیـون درشتابدهنده ها تولید نمود. پیون نیز خود از برخورد هسته های سبک از قبیل هیدروژن، دوتریوم وتریتیوم بـا هسته های دیگرکه به مقدار مساوی پروتون و نوترون داشته باشد مانند لیتیوم و بریلیوم تولید می شود و طـول عمری حدود s $^{-۸}$۱۰ دارد و پس از این زمان به میون و پادنوترینو میون تبدیل خواهد شد.

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu^- \qquad (۸-۱)$$

میون یک ذره نا پایدار با طول عمری بیشترازطول عمر پیون است ولی در نهایت s $^{-۶}$۲/۲×۱۰ پس از تولید به الکترون که ذره پایداری است تبدیل می شود.

$$\bar{\mu} \rightarrow e^- + \bar{\nu_e} + \nu_\mu \qquad (۹-۱)$$

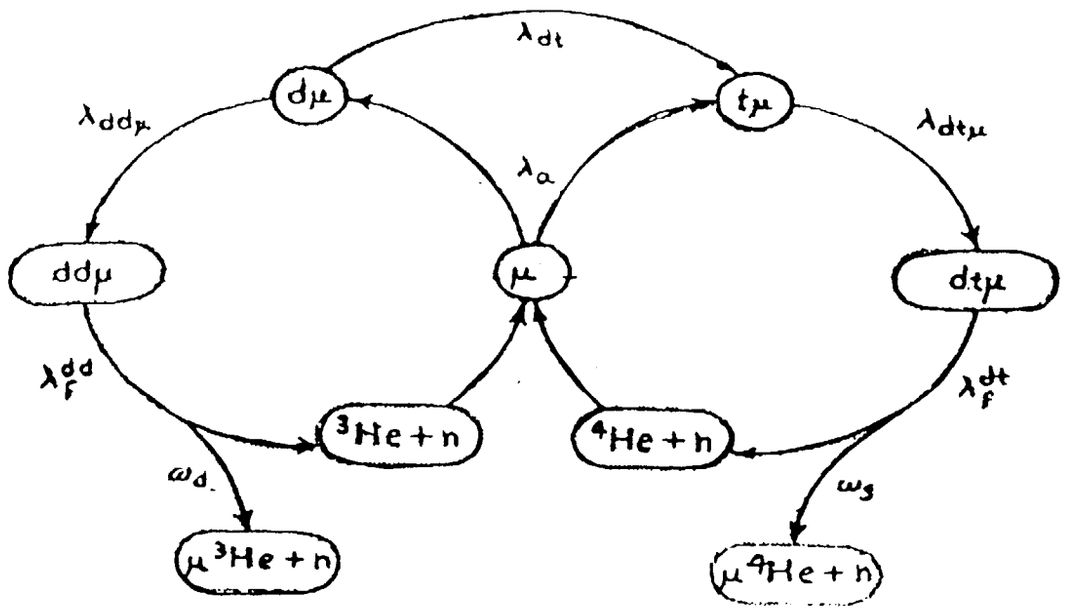
تفاوت میون با الکترون تنها در جرم و عدد کوانتومی لپتونی است. جرم سکون میون منفی، ۲۰۶ برابر جـرم سکون الکترون است و به همین دلیل انرژی بسـتگی بیشـتری نسـبت بـه الکترون در اتـم هیـدروژن دارد [۹]. بنابراین در برخورد با اتم هیدروژن بلافاصله جایگزین الکترون شده و یک اتم میوندار بـه انـدازه تقریبـاً ۲۰۶ برابر کوچکتر از اتم الکترون دار تولید می کند. همجوشی کاتالیزور میونی به دلیل اینکه در دمـــای معمولی انجام می شود، به همجوشی سرد معروف است. در همجوشی سرد حتی از سـوختهای بسیار سـرد هیـدروژن جامد نیز استفاده می کنند [۹].
درهمجوشی کاتالیزور میونی نیازی به ایجاد دما و فشارغیرعادی نیست. دراین فرآیند یک دسته ازواکنشهایی که با جایگزینی میون منفی به جای الکترون در اتمهای هیدروژن آغازمی شود، منجر به تولید یک مولکـول میوندار می شوند که در آن به جای یک الکترون یک میون قرار گرفته اسـت. در حقیقـت ذره میـون، بـاعث نزدیک شدن هسته ها شده، فشردگی لازم جهت انجام همجوشی را فراهم می سازد. عـلاوه برایـن فشـردگی که باعث نزدیکی هسته ها به مقدار ۵۰۰fm ~ می شود، از انرژی جنبشی هسته ها جهت عبور از سـد کولنـی و انجام همجوشی از انرژی نوسانی مولکول بـه دسـت مـی آیـد [۴]. در شـکل ۱-۱ مقایسـه ای از همجوشـی هسته‌ای از طریق نفوذ درسد کولنی و همجوشی کاتالیزورمیونی به عمل آمده است.



شکل۱-۱- نفوذ در سد کولنی الف) همجوشی کاتالیزور میونی، ب) همجوشی گرما هسته ای

همانطور که ذکر شد در طی واکنشهای همجوشی کاتالیزور میونی فرایند های متفاوتی انجام مـی شـود. ایـن فرایندها به صورت زنجیره ای انجام می گیرند و باعث انتقـال جمعیـت بیـن اتمهـا و مولکولـهای میونـدار در حالتهای مختلف فیزیکی می شوند. چون یک میون درطی عمر خود این فرایندها را به دفعات انجام می دهد، بنابراین واکنشهای زنجیره ای به شکل یک چرخه انجام مـی شـوند. بـرای مشـخص شـدن بـهتر نحـوه انتقـال جمعیت میونی این حالتها در واکنشهای زنجیره ای از رسم چرخه های همجوشی استفاده می شود.

هر چرخه شامل نمادهایی برای حالتهای مختلف فیزیکی است که توسط خطوط جهت دار به یکدیگر وصـل شده اند. این خطوط، جهت انتقال جمعیت حالتهای میونی را نشان می دهند. درکنار این خطوط آهنـگ ایـن انتقالات با نماد های اندیس دار λ نمایش داده مـی شـود. قسـمتی از چرخـه همجوشـی کـه منجـر بـه تولیـد مولکول $dt\mu$ می شود بیشترین سهم را درافزایش بهره همجوشی خواهد داشـت. چرخـه هـای کامل‌ترشـامل حالتهای فیزیکی بیشتری هستند. اما در چرخه های خلاصه شده، از رسم حالتهای فیزیکی کم اهمیـت و کـم جمعیت صرفنظر می شود. مطرح شدن حالتهای فیزیکی جدید منجر به رسم چرخه همجوشی کامل‌تری شده است. همچنین بسته به اینکه مخلـوط سـوخت متشـکل ازچـه نـوع عنـاصر وایزوتـوپـهایی باشـد، واکنشـهای زنجیره‌ای متفاوت و در نتیجه چرخه هـای متفـاوتی بـاید در نظـر گرفتـه شـود. شـکل ۱-۲ نمـایی از چرخـه همجوشی کاتالیزور میونی را نشان می دهد.



شکل ۱-۲ - چرخه ساده شده همجوشی کاتالیزور میونی در مخلوط D/T

روشهای مختلفی برای بدست آوردن آهنگ چرخه وبررسی عوامل مختلف روی بهره همجوشی ارائه شده است. یک روش برای بررسی چرخه، حل معادلات سینماتیک چرخه است که کاملاً دقیق نیست. دراین کار تحقیقاتی ما به دنبال آن هستیم که تمام فرآیندهایی را که در چرخه اتفاق می‌افتد به طور دقیق شبیه سازی کنیم. برای این منظور از روش مونت کارلو استفاده خواهیم کرد که در فصلهای آینده این روش بررسی خواهد شد. به این وسیله خواهیم توانست اثر اندرکنشهای فوق ریز و تاثیر انرژی اتمهای میوندار در تشکیل مولکولهای میوندار و به خصوص اثر اتمهای فوق حرارتی و وا انگیختگی اسپینی را مستقیماً در برخوردها در نظر بگیریم.