به نام خداوند جان وخرد

کزو برتر اندیشه بر نگذرد

خداوند کیوان و گردان سپهر

فروزندهٔ ماه و ناهید و مهر

۱۳۲۵۱۵

دانشگاه تهران

دانشکدهٔ علوم

"حل عددی معادلات آهنگ ناظر بر همجوشیِ با موئون کاتالیز شده در مخلوط دوتریم- تریتیم و محاسبهٔ بهرهٔ همجوشی"

اجراء:

داریوش داودی مبارکه

استاد راهنما:

دکتر منیژهٔ رهبر

استاد مشاور:

دکتر هوشنگ روحانی نژاد

پایان نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد

در

رشتهٔ فیزیک کاربردی

۱۳۸۸/۱۲/۱۶

بهمن ۱۳۷۹

مرکز اطلاعات و مدارک علمی خوارزمی
تهیه مدارک

۱۳۲۵۱۵

الف/ ۲۹

بسمه تعالی

جمهوری اسلامی ایران

دانشگاه تهران

شماره : .....

تاریخ : .....

پیوست : .....

اداره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً باطلاع می رساند که جلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد **آقای داریوش داودی مبارکه**

تحت عنوان :" **حل عددی معادلات آهنگ ناظر بر همجوشی با موئون کاتالیز شده در مخلوط دوتریم ـ تریتیم و محاسبه بهره همجوشی** "

درتاریخ ۸۰/۴/۴ در محل دانشکده علوم دانشگاه تهران برگزار گردید.

هیات داوران براساس کیفیت پایان نامه ، استماع دفاعیه و نحوه پاسخ به سوالات ، پایانه نامه ایشان را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک معادل با شش واحد با نمره ۱۸/۵ با درجه بسیار خوب مورد تایید قرار دارد.

هیات داوران

سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی ـ دانشگاه	امضاء
۱ ـ استاد راهنما	خانم دکتر منیژه رهبر	استادیار ـ دانشگاه تهران	
۲ ـ استاد مشاور	آقای دکتر هوشنگ روحانی نژاد	استاد ـ دانشگاه تهران	
۳ ـ استاد داور خارجی	آقای دکتر محمد لامعی رشتی	استاد ـ سازمان انرژی اتمی	
۴ ـ استاد داور داخلی	آقای دکترمحمد پیشه ور	دانشیار ـ دانشگاه تهران	
۵ ـ نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر محمد تقی توسلی	دانشیار ـ دانشگاه تهران	

دکترمحمد تقی توسلی
سرپرست تحصیلات تکمیلی فیزیک

دکتر عزت اله ارضی
مدیر گروه آموزشی فیزیک

دکتر رسول اخروی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

چکیده

کار انجام گرفته ای که گزارش آن قسمتهایی از نوشتهٔ حاضر را تشکیل می دهد، در ابتدا بـه طـور دقیـق حل عددی یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی، مرتبهٔ اول، خطی، همگن، و دارای ضرا ئب ثـابت، بـا بهره گیری از روشهای ماتریسی می باشد. این دستگاه خود زیـر مجموعـه ای از یـک مجموعـهٔ بـزرگـتر (موجود در مرجع [۷]) است که، به معادلات آهنگ موسوم بوده و در واقع، معادلات دینـامیکی نـاظر بـر چگالی (عددی) برخی طرفهای درگیر، در زنجیره واکنشهای همجوشیِ با موئـون کاتـالیز شـده در مخلـوط دوتریم-تریتیم می باشند. در ادامه با استفاده از نتایج این حل، ابتدا برخی از نتـایج بـه دسـت آمـده در مرجع [۷]، مورد تحقیق قرار گرفته اند. سپس چندین نمودار سـودمند بـرای درک کیفـی و کمـی برخـی جنبه های زنجیره، به دست آورده شده اند. در نهایت نیز، تعدادی نقطهٔ نموداری بـرای بـهرهٔ همجوشـی تحصیل گردیده و، با متناظرهای تجربی خود مورد مقایسه قرار گرفته اند. روشـهای بـه کـار رفتـه بـرای انجام حل یاد شده، در فصل چهارم توضیح داده شده اند. گزارش نتایج کار و برنامه های عددی منجر بـه این نتایج نیز، در فصل پنج و پیوست های الف تا ج آورده شده اند.

در مقدمهٔ نوشتار، پس از گزارشی کلی از وضعیت کنونی (تا سـال ۱۹۹۰) تولیـد انـرژی از طریـق

واکنش هسته ای شکافت، و برآورد کمی منابع آن، و نیز با رد واکنش هسته ای همجوشی خالص به عنوان راهی عملی جهت تولید انرژی با موازنهٔ مثبت (البته در چشم انداز فعلی)، در نهایت فرآیند زایش پلوتونیم از اورانیم (و نیز توریم از اورانیم) توسط رآکتورهای دو رگهٔ همجوشی-شکافت، به عنوان چارهٔ مشکل تولید انرژی به روش هسته ای، و توسعه دهندهٔ منابع آن معرفی گشته است. سپس ضمن مقایسهٔ انواع روشهای موجود برای واکنش همجوشی که توسط بشر به کار گرفته شده اند، نقش ممتاز همجوشی به روش محبوس سازی شیمیایی، یا به بیان دیگر همجوشیِ با موئون کاتالیز شده مورد تأکید قرار گرفته است. درفصل یک سعی شده است تا خواننده، با تاریخچهٔ همجوشیِ با موئون کاتالیز شده، و زنجیره واکنشهای رویدهنده در آن که نهایتا منجر به همجوشی می شوند، آشنا شود. در فصل دوم، عوامل مؤثر بر بهرهٔ همجوشی، مورد بررسی قرار گرفته اند. دست آخر نیز در فصل سوم طرح مفهومی رآکتور قدرت دو رگهٔ همجوشی-شکافت بر اساس همجوشیِ با موئون کاتالیز شده به عنوان چشم اندازی عملی و با مزیت برای تولید انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

تقدیر و تشکر

وظیفهٔ خود می دانم تا از اشخاصی که بدون الطاف و کمکهای ایشان قادر به انجام و ارائهٔ کار حاضر نبودم قدردانی و صمیمانه سپاسگذاری نمایم. در این میان به ویژه لازم می بینم از استاد راهنمای گرامی خانم دکتر منیژهٔ رهبر برای پیشنهاد موضوع بسیار سودمند حاضر و نیز به خاطر راهنماییهای کاملا مؤثرشان در اجرای آن و همچنین از شورای محترم تحصیلات تکمیلی گروه فیزیک، سرپرست محترم تحصیلات تکمیلی گروه آقای دکتر محمد تقی توسلی، و مدیریت محترم گروه آقای دکتر هوشنگ روحانی نژاد به خاطر تقبل زحمات متعدد جهت تأمین زمان لازم برای به ثمر رسیدن کار یاد کنم.

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل ۱ همجوشیِ با موئون کاتالیز شده ۱۱

۱-۱ تاریخچهٔ ه.مو.ک ۱۱

۱-۲ موضوعهای تحقیق ۱۵

۱-۳ زنجیرهٔ ه.مو.ک ۱۵

۱-۴ تشکیل اتمهای موئونی ۱۹

۱-۴-۱ کندسازی موئون ۱۹

۱-۴-۲ موئون گیری ۲۰

۱-۴-۳ واانگیختگی اتمهای موئونی ۲۲

۱-۴-۴ گرمایی شدن اتمهای موئونی ۲۴

۱-۴-۵ انتقال موئون و ضریب q_{1S} ۲۶

۱-۵ تشکیل مولکولهای موئونی ۲۷

۱-۵-۱ تشکیل غیر تشدیدی (مستقیم) ۲۸

۱-۵-۲ تشکیل تشدیدی ۲۹

۱-۵-۳ تشکیل شبه تشدیدی ۳۲

۱-۶ همجوشی ۳۳

۱-۷ چسبیدگی و باز فعال شدگی موئون ۳۳

۱-۸ مفهوم محبوس سازی شیمیایی ۳۴

فصل ۲ جنبش شناسی زنجیرهٔ همجوشیِ با موئون کاتالیز شده ۳۶

۲-۱ کارآیی همجوشی ۳۶

۲-۱-۱ آهنگ چرخهٔ موئونی ۳۸

۲-۱-۲ از کف دهیهای موئون ۴۳

فصل ۳ طرح مفهومی رآکتور قدرت از نوع دورگهٔ همجوشی-شکافت با موئون کاتالیز شده ۴۹

۳-۱ بهرهٔ همجوشی لازم جهت برپایی یک رآکتور قدرت از نوع همجوشی خالص با موئون کاتالیز شده ۴۹

۳-۲ طرح مفهومی رآکتور قدرت از نوع دورگهٔ همجوشی-شکافت با موئون کاتالیز شده ۵۱

۳-۲-۱ تولید پیونهای منفی در مادهٔ هدف ۵۳

۳-۲-۲ تولید موئونها در تبدیل کننده ۵۵

۳-۲-۳ تقویت انرژی و تولید نوترونهای سریع در ترکیب کننده ۵۵

۳-۲-۴ القای شکافت، زایش ایزوتوپهای شکافت پذیر، و تولید تریتیم در پتو ۵۶

۳-۲-۵ بهرهٔ الکتریکی کل حاصل از طرح مفهومی ای.تی.آر و مقایسهٔ آن با سایر طرحهای مفهومی دو رگه و نیز همجوشی خالص ۵۸

۳-۲-۶ باز چرخانی بخشی از باریکه که برهمکنش قوی نداشته است ۶۱

فصل ۴ معادلات آهنگ و روش حل آنها در کار حاضر ۶۳

۴-۱ منبع و تعریف معادلات آهنگ ۶۳

۴-۲ نوع معادلات آهنگ و روش حل آنها وقتی غلظتها ثابت باشند ۶۵

۴-۳ روش حل معادلات آهنگ در کار حاضر ۶۶
۴-۳-۱ بخش تحلیلی راه حل ۶۷
۴-۳-۲ بخش عددی راه حل ۷۱
۴-۳-۲-۱ روشهای عددی استفاده شده برای محاسبهٔ ویژه مقدارها ۷۱
۴-۳-۲-۲ روش عددی استفاده شده برای محاسبهٔ ویژه بردارها و ضرایب جواب ۷۴

فصل ۵ نتایج به دست آمده از کار حاضر ۷۶
۵-۱ مقایسهٔ برخی نتایج به دست آمده از کار حاضر با نتایج متناظر در مرجع [۷] ۷۶
۵-۲ نتایج نموداری به دست آمده برای توزیع زمانی چگالیهای موئون، و اتمها و مولکولهای موئونی ۸۱
۵-۳ نتایج به دست آمده برای بهرهٔ همجوشی در هر سه شاخه ۹۲
۵-۴ مقایسهٔ نتایج به دست آمده برای بهره با نتایج تجربی متناظر در مرجع [۹] ۹۳

نتیجه گیری و پیشنهاد ۹۷

پی نویس ۱۰۰

مراجع ۱۰۳

واژه نامه ۱۰۵

پیوست الف قسمتی از برنامهٔ منجر به شکل ۵-۲ ۱۰۹

پیوست ب قسمتی از برنامهٔ منجر به شکل ۵-۴ ۱۱۶

پیوست پ قسمتی از برنامهٔ منجر به مجموعه شکلهای ۵-۵ ۱۲۴

پیوست ت قسمتی از برنامهٔ منجر به شکل ۵-۶ ۱۳۲

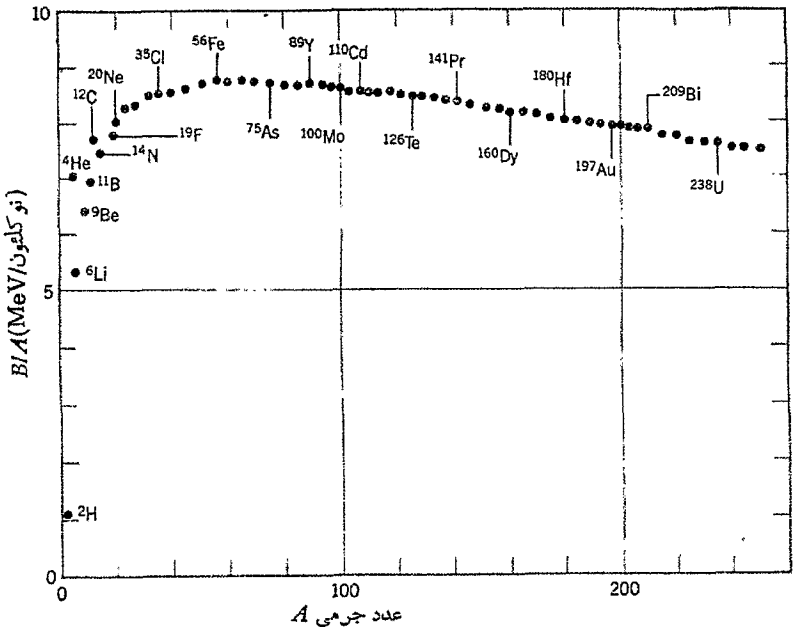
پیوست ث قسمتی از برنامهٔ منجر به شکل ۵-۷ ۱۴۱

پیوست ج زیربرنامه های مشترک بین برنامه های کار حاضر ۱۴۸

مقدمه

برای تهیهٔ ایـن مقدمـه از مطـالب موجـود در مراجـع [۶] و [۱۳]، و همچنیـن فصـل هـای سـه و ۱۴ از مراجع[۱] و [۲] بهره برداری شده است در حالی که جدیدترین این منابع مربوط به سال ۱۹۹۲ می باشد.

در سدهٔ اخیر پیشرفت، توسعه، وهمچنین رشد چشمگیر جمعیتـی حـل مسـالهٔ تـامین انـرژی را بـا استفاده از منابعی جز سوختهای فسیلی به یکی از مهمترین چالشـهای جامعـهٔ بشـری و بخصـوص مجـامع علمی و فنی مربوطه بدل ساخته است. با این انگیزه بشر طی هشتاد سال گذشته عـلاوه بـر راهـهای کـم بازده تر دیگر موفق به کشف و شناسایی دو روش عمدهٔ استخراج انرژی از منابع هسته ای گردیده اسـت. این دو روش که آزادسازی انرژی توسط دو نوع واکنش هسته ای شکافت و همجوشی می باشند بـا توجـه به نمودار انرژی بستگی به ازای هستک ایزوتوپها که بر حسب عدد جرمی آنها رسم شده است به سادگـی قابل توجیه می باشند (شکل م-۱). از این نمودار استنباط می شود که اگر به طریقـی بتـوان ایزوتـوپـهای متناظر با نقاط دامنهٔ نمودار را به ایزوتوپهای متناظر با نقاط نزدیکتر به قله تبدیل کرد مقداری انرژی کـه برابر است با اختلاف انرژی بستگی کل متعلق به ایزوتوپهای قبل و بعد از تبدیل، آزاد خواهـد شـد. ایـن تبدیل بر روی یک ایزوتوپ مربوط به دامنهٔ راست بـه معنـای شـکافته شـدن یـک هسـتهٔ سـنگینتر بـه هسته هایی سبکتر و برای دامنهٔ چپ به معنای جوش خوردن دو هستهٔ سبکتر و تولید محصولاتـی حـاوی یک هستهٔ سنگینتر می باشد. تولید انرژی توسط روش همجوشی نسبت به روش دیگـر دارای دو مزیـت مهم است. یکی اینکه ذخایر سوختی همجوشی که هسته های سبک نظیر ایزوتوپهای هیدروژن می باشـند نسبت به ذخایر سوختی واکنش شکافت که از مجموعه ای از ایزوتوپهای سـنگین نظـیر اورانیـوم تشـکیل میابند بسیار فراوانترند و دیگر آنکه محصولات یا اصطلاحا پاره های همجوشی مانند پـاره هـای شـکافت عموما پرتوزا نبوده و لذا سلامتی انسان و محیط زیست او را به مخاطره نمی اندازند.



شکل م-۱ انرژی بستگی هسته ای به ازای هستک ایزوتوپها بر حسب عدد جرمی آنها. از مرجع [۱]، ش. ۳-۱۶.

از دو نوع واکنش فوقا یادشده تنها شکافت می باشد که در دهه های اخیر بـــرای تولیـد انـرژی بـا بهره ای بزرگتر از واحد و به صورت مهار شده مورد بهره برداری قرار گرفته است. ولی دیگری بـــه دلیـل سختی شرایط علمی، فنی، و اقتصادی لازم جهت مهار آن برای تولیـد انـرژی بـا موازنـهٔ مثبـت هنـوز در مرحلهٔ تحقیقاتی بسر می برد و این در حالی است که پیشنهاد این نوع واکنش بعنوان راهـــی ممکـن بـــرای تولید انرژی از نظر زمانی دارای پیشینهٔ بیشتری نسبت به واکنش نوع اول می باشد.

ابتدا اجازه دهید تا نگاهی کوتاه به وضعیت تولید انرژی توسط شکافت داشته باشیم و از این رهگذر مقدورات و همچنین محدودیتهای آن را مد نظر قرار دهیم. مهمترین واکنش شکافت مربوط می شود بـــه جذب یک نوترون کند توسط ایزوتوپ سبک اورانیم

$$n_{slow} + {}^{۲۳۵}U \rightarrow \text{fragments} + ۲۰۰ \ \ MeV \qquad (۱-م)$$

این واکنش حدود ۵۰ میلیون برابر سوختن یک اتم کربن انرژی آزاد می کند

$$C + O_۲ \rightarrow CO_۲ + ۴,۲ \ \ eV \qquad (۲-م)$$

با وجود این مقدار کل این ایزوتوپ که فراوانی آن در اورانیم طبیعی تنها ۰,۷۲٪ است در کرهٔ ما محـــدود می باشد به طوری که اگر قرار شود تمام تولید انرژی کنونی جـــهان کـه شـکافت مسـؤول فقـط ۱۷٪ آن می باشد توسط این نوع واکنش تحقق پذیرد منابع کشف شده و قابل دسترس آن پس از ۵۰ سـال پایـان می پذیرند و اگر رشد مصرف انرژی نیز به حساب آورده شود این زمان کوتاهتر هم خواهد بود.

یک راه شناخته شده برای افزایش منابع سوخت شکافت پذیر حرارتی در درجهٔ اول کمـک گرفتـن از واکنش

$$n_{fast} + {}^{۲۳۸}U \rightarrow {}^{۲۳۹}Pu \qquad (۳-م)$$

می باشد که طی آن یک ایزوتوپ اورانیم سنگین با جذب یک نوترون سریع تبدیل به یکی از ایزوتوپـــهای پلوتونیم که خود (در یک رآکتور با نوترون های گرمایی (کند)) قابل شکافت می باشد تبدیل می شود و به علاوه به ازای هر جذب با احتمال معینی شکافت نیز صورت می گیرد. به این ترتیب ملاحظـــه مـی شـود اصولا تقریبا تمام موجودی اورانیم طبیعی به خدمت شکافت درمی آید. البته علاوه بر ایـن یـک واکنـش مشابه زایندهٔ دیگر نیز تولید ${}^{۲۳۳}U$ شکافت پذیر می باشد که با جذب یک نوترون سریع توسط یک ${}^{۲۳۲}Th$ صورت می پذیرد.

تاکنون تنها ساز و کاری که در آن فرآیند تبدیل اورانیم به پلوتونیم به نحو مؤثری به تحقق رسـیده است مورد رآکتورهای موسوم به زاینده می باشد که اساسا بر مبنای نوترونهای سریع کار می کنند. ولـــی متأسفانه اینها از کارآیی پایینی برخوردار بوده اند به طوری که برای تامین سوخت یک رآکتور گرمایی بـــا سوخت پلوتونیم کارکرد سه رآکتور سریع زاینده الزامی می باشد. بنابراین جای تعجب نیسـت کـه هنـوز جستجو برای یافتن راههایی دیگر جهت عملی شدن کارآتر این فرآیند در جریان می باشـد. یکـی از ایـن راهها زایش الکتروهسته ای است که در سال ۱۹۵۱ پیشنهاد شد. در این روش یک باریکه از پروتونـــهای با انرژی GeV ۱ ≈ و خروجی از یک شتابدهنده با یک هدف جرمْمَند از ${}^{۲۳۸}U$ برخـورد داده مـی شـود که در نتیجهٔ برخورد هر پرتابه اولا ۲۰ ≈ هستهٔ اورانیم شکافته می شوند و ثانیا ۶۰ ≈ هستهٔ ${}^{۲۳۹}Pu$ توسط نوترونهای حاصل از شکافتها زاییده می شوند به طـوری کـه نـهایتا بـه ازای هـر پروتـون روی هـم رفتـه Gev ۲۵ ≈ انرژی آزاد می گردد. ولی از سوی دیگر بـا بـه حسـاب آوردن بـازده شـتابدهنده، انـدازهٔ

محدود اورانیم هدف، هزینهٔ نصب، و نیز از کف دهی نوترون به سبب جذب توسط مواد سازه ای دستگاه دست آخر تراز انرژی نامطلوب می باشد. لذا این روش تاکنون از حد مرحلهٔ تحقیقات آزمایشی و پروژه های ابتدایی فراتر نرفته است.

راه دیگر برای تولید پلوتونیم استفاده از نوترونهای سریعی می باشد که در نتیجهٔ همجوشی هسته های دوترون و تریتون شکل می گیرند

$$d + t \rightarrow {}^{4}He(۳,۵\ \ MeV) + n(۱۴,۱\ \ MeV) \qquad (م-۴)$$

اگر نوترون حاصل که MeV ۱۴,۱ انرژی دارد در یک هدف اورانیم جرممند وارد شود باعث القای شکافت در تقریبا یک ^{۲۳۸}U می گردد که در نتیجهٔ آن چهار نوترون جدید نیز ایجاد می شود. با ورود این چهار نوترون به هسته های ^{۲۳۸}U چهار هستهٔ ^{۲۳۹}Pu تولید می شود. البته در واقع یکی از این نوترونها می بایست برای باز تولید یک تریتیم (که عملا در طبیعت بسیار کمیاب است) با لیتیم مطابق رابطهٔ پایین واکنش داشته باشد

$$n + {}^{۶}Li \rightarrow {}^{۴}He + t \qquad (م-۵)$$

به دلیل مشخصات رآکتورهای گرماهسته ای ویژهٔ واکنشهای همجوشی همچون واکنش (م-۴) که امروزه طراحی شده اند به ازای هر نوترون ناشی از این واکنش از طرفی تنها ۰,۶ شکافت در هدف اورانیم انجام می گیرد واز طرف دیگر نیز فقط یک هستهٔ پلوتونیم تولید می شود. البته حتی در این شرایط نیز کارکرد چنین روشی مجموعا از نظر بازدهٔ انرژی در اثر شکافتهای القاء شده و همچنین بازدهٔ زایش هسته های شکافت پذیر پلوتونیم رضایت بخش می باشد. چنین رآکتورهایی را که اساس کار آنها بر پیوند واکنشهای همجوشی و شکافت استوار است دورگه می نامند. علاوه بر این نامگذاری مجموعه واکنشهای دوگانهٔ همجوشی و شکافت که مبنای کار چنین رآکتورهایی است با اصطلاح ترکیب+شکافت نیز شناخته می گردد در جایی که منظور از ترکیب واکنش همجوشی منجر به نوترون سریع (واکنش (م-۴)) می باشد. همچنین از اورانیم هدف موجود در چنین رآکتورهایی که مخلوط دوتریم و تریتیم را احاطه کرده است به عنوان پتوی شکافت (یا برخی اوقات پتو) یاد می شود.

در اینجا بایستی به عامل محدود کنندهٔ این روش که تامین Li^{6} می باشد اشاره کرد. منابع لیتیم در کرهٔ زمین کم و همچنین وسیعا پراکنده هستند به طوری که اگر بخواهیم نتیجهٔ این محدودیت را خلاصه کنیم باید بگوییم استعداد ذخیره شده از نظر منابع انرژی همجوشی (که اساسا همانگونه که در ادامهٔ بحث خواهیم دید در حال حاضر از طریق همان واکنش (م-۴) قابل آزادسازی هستند) در کرهٔ ما طی جریان آفرینش آن از مقدار متناظر آن برای مورد منابع انرژی شکافت تجاوز نمی کند. البته این بحث تمام منابع را شامل می شود که در واقع بیشتر آنها غیر قابل دسترسند.

اکنون نگاهی کوتاه خواهیم داشت به دستاوردها در زمینهٔ تولید انرژی توسط همجوشی به روش گرماهسته ای تا از این طریق یک تصویر کلی از تواناییها و محدودیتهای این روش به دست آوریم. همجوشی دو هسته و ایجاد یک هستهٔ سنگینتر و البته پایدارتر زمانی تحقق می پذیرد که ابتدا این دو بدون هیچ پوشش الکترونی به حد لازم به یکدیگر نزدیک شده و سپس با داشتن انرژی جنبشی کافی ضمن نفوذ به سد مشترک پتانسیل دافعهٔ مابینشان در برد نیروهای قوی یکدیگر قرار گرفته و ضمن یک برخورد هسته ای غیر کشسان با هم پیوند هسته ای برقرار کنند. بنابراین می توان نتیجه گرفت برای وجود احتمال قابل ملاحظه جهت وقوع چنین رویدادی هسته ها می بایست علاوه بر دارا بودن انرژی جنبشی کافی در یک فضای به اندازهٔ کفایت کوچک نیز محبوس گردند. تجربیات نشان می دهند که این انرژی در حدودی است که هر ظرف مادی حبس کنندهٔ هسته ها را در صورت تماس با آنها به صورت بخار در خواهد آورد. لذا در اینجا اندیشهٔ محبوس سازی غیر مادی پیش می آید.

تاکنون چهار روش محبوس سازی شناسایی شده اند. اولین روش که مختص ستارگان است محبوس سازی گرانشی نام دارد (مرجع [۴] صفحهٔ ۷۴) که در آن هسته ها که از تشکیل دهندگان یک پلاسمای خیلی داغ می باشند به واسطهٔ نیروی گرانشی چنان به یکدیگر نزدیک شده اند که در یک نمونهٔ افراطی آن مربوط به کوتوله های سفید چگالیهایی در حدود $۱۰^{۸}$ برابر چگالی هیدروژن مایع (یا به اختصار چ.ه.م) را ایجاد کرده اند. چ.ه.م که یکایی برای سنجش چگالیهای عددی ذرات می باشد برابر است با

$$۱\ LHD = ۴,۲۵ \times ۱۰^{۲۲}\ \ atom/cm^{۳} \qquad (م-۶)$$

دمای مرکزی این ستاره ها نیز که به شکلی نمایانگر انرژی جنبشی-گرمایی هسته های محبوس می باشد

مقداری حدود $۱۰^{۷}$ کلوین است[۱]. البته در ستاره ها بر خلاف موارد همجوشی انجام گرفتـــه توسـط بشـر ایزوتوپهای همجوشی کننده به سبکترین آنها یعنی ایزوتوپهای هیدروژن محدود نبوده بلکه در میـــان آنـها ایزوتوپهای سنگینتر نیز مشاهده می شوند. در واقع همیـــن روش همجوشـی اسـت کـه در خورشـید هـم صورت می پذیرد و لذا مسؤول تمام انواع انرژیهای نهان و آشکار در سیارهٔ ما مـی باشـد. اندیشـهٔ ایجـاد همجوشی از طریق برپا داشتن و محبوس ساختن پلاسماهای خیلی داغ نیز از همینجا نشأت می گیرد.

روش دیگر همجوشی از طریق محبوس سازی مغناطیسی می باشـد. در ایـن روش کـه یکـی از دو روش گرماهسته ای ابداع شده توسط بشر می باشد پلاسمای خیلی داغ در یک میدان مغناطیسی ویژه ودر ناحیهٔ فضایی کاملا مشخص محبوس و محدود می گردد. تعداد کل همجوشیهای پایه که در واحـد حجـم چنین فضایی روی می دهد از رابطهٔ زیرین به دست می آید

$$Y = n_{۱} n_{۲} f(T) \qquad (۷-م)$$

که در آن $n_{۱}$ و $n_{۲}$ چگالیهای (عددی) دو نوع هستهٔ همجوشی کننده در همجوشیهای پایه و $f(T)$ تـــابعی از دما می باشد. هسته های مورد توجه برای انجام همجوشی در رآکتورهای همجوشی چه به دلیل فراوانی و چه به دلیل ایجاد کمینهٔ سد پتانسیل دافعه ایزوتوپهای هیدروژن یعنی پروتیم، دوتریم، و تریتیم میباشند. روابط مختلف همجوشی برای این هسته ها به قرار زیر هستند

$$p + d \rightarrow {}^{۳}He + \gamma + ۵,۵ \ \ MeV, \qquad (م-۸-الف)$$

$$p + t \rightarrow {}^{۴}He + \gamma, \qquad (م-۸-ب)$$

$$d + d \rightarrow {}^{۳}He + n + ۳,۲۷ \ \ MeV, \qquad (م-۸-پ)$$

$$d + d \rightarrow p + t + ۴,۰۳ \ \ MeV, \qquad (م-۸-ت)$$

$$d + t \rightarrow {}^{۴}He + n + ۱۷,۵۹ \ \ MeV, \qquad (م-۸-ث)$$

$$t + t \rightarrow {}^{۴}He + ۲n + ۱۱,۳۳ \ \ MeV. \qquad (م-۸-ج)$$

هرچه زمان نگهداری پلاسما در حبس میدان مغناطیسی (زمان محبوس سازی) و تحت شرایط مطلـوب و لازم بیشتر باشد وقوع همجوشیها محتملتر خواهد بود. یکـی از ایـن شـرایط لازم چگـالی هـرچـه بـالاتر می باشد که در عمل خود با زمان محبوس سازی ضدیت متقابل دارند. بدین لحاظ بین چگالی پلاسـما n و زمان محبوس سازی آن τ رابطه ای به دست آورده شده است به نام معیار لاؤسـون کـه کمینـهٔ زمـان لازم برای حبس پلاسمایی با چگالی ای معین جهت حصول بهرهٔ انرژی بیش از واحد را در دمـای بحرانـی مربوطه به دست می دهد

$$n\tau > c(T_c) \qquad (۹-م)$$

در جایی که $c(T_c)$ برای پلاسمای دوتریم-تریتیم (یا بـه اختصـار د-ت) برابـر $۱۰^{۱۴}\ s\cdot cm^{-۳}$ و بـرای پلاسمای دوتریم-دوتریم (یـا بـه اختصـار د-د) مسـاوی $۱۰^{۱۵}\ s\cdot cm^{-۳}$ مـی باشـد البتـه در دماهـای بحرانی ای که به ترتیب برابرند با $K \approx ۵۰\times۱۰^{۶}$ و $K \approx ۳۰۰\times۱۰^{۶}$. یک مثال نمونه بـرای مقـادیر بـه دست آمده در ازای دو کمیت چگالی پلاسـما و زمـان محبـوس سـازی آن مربـوط بـه چنـبرهٔ توکـامک می باشد. چگالی ای که این دستگاه با استفاده از فشار مغناطیسی حاصل از به کارگیری آخرین فـن آوری میتواند در پلاسما ایجاد کند مقدار پایین $۱۰^{۱۶}$ – $۱۰^{۱۴}$ ذره در $cm^{۳}$ است که با استفاده از معیـار لاؤسـون زمان محبوس سازی متناظر با آن مقدار نسبتا طولانی ۱ – $۱۰^{-۲}$ s می باشد.

برای ساختن رآکتورهای تحقیقاتی همجوشی از نوعی که توضیح داده شد تـاکنون سـرمایه گـذاری گزافی صورت گرفته است ولی با وجود این هنوز برای رسیدن به بـهرهٔ انـرژی واحـد نیـاز بـه ماشـینهای بزرگتری احساس می شود و علیرغم کوششهای بـه عمـل آمـده راه میـانبری بـرای سـاخت رآکتورهـای همجوشی گرماهسته ای در مقیاس بزرگ پیدا نشده است. برای نمونه یک طرح ۲۰ میلیارد دلاری بـرای ساخت یک رآکتور گرماهسته ای آزمایشی بین المللی (آی.تـی.ای.آر) در دسـت بررسـی مـی باشـد کـه طرف های شرکت کننـده در آن عبـارتند از ایـالات متحـدهٔ آمریکـا، ایـالات مسـتقل مشـترک المنـافع (سی.آی.اس)، ژاپن، و تمامی اروپا بعنوان شریک چهارم. همچنین پیش بینی می شود عرضهٔ اولین رآکتـور همجوشی تجارتی زودتر از سال ۲۰۴۰ امکان پذیر نباشد.

سومین روش همجوشیِ گرماهسته ای بـر اسـاس محبـوس سـازی بـا اسـتفاده از خـاصیت لختـی

می باشد. در این شیوه سوخت که مخلوط دوتریم-تریتیم در چگالی مایع بوده و به شکل ساچمه ای کوچک در رآکتور مربوطه قرار داده می شود به طور همزمان و از سمتهای مختلف مورد تابش ضربتی چندین باریکهٔ همدوس و شدید لیزری قرار می گیرد. لذا سوخت به طور ناگهانی تا دماهای بسیار بالا گرم می شود که در نتیجهٔ آن ذراتی (هسته هایی) بسیار پر انرژی که یک پلاسمای خیلی داغ را تشکیل می دهند شروع به خروج جمعی بسیار سریع از سطح ساچمه می کنند. در نتیجه یک فشار ضربتی بسیار بالا بنا به قانون سوم نیوتن که ناشی از خاصیت لختی این خروج سریع می باشد بر ساچمهٔ سوخت تحمیل می شود. این فشار از یک سو سوخت را چنان گرم می کند که به صورت پلاسمایی بسیار داغ در می آید و از سوی دیکر چنان آن را متراکم می سازد که هسته های آن نزدیکی مطلوب برای شروع واکنشهای همجوشی را به دست می آورند. مجموع این شرایط باعث می شود که همجوشیها در مرکز ساچمه و سپس در لایه های بیرونیتر به وقوع بپیوندند.

زمان مابین برخورد باریکه ها به سطح سوخت تا شروع همجوشیها نمی بایستی از حدود $۱۰^{-۱۲}$ s تجاوز کند چرا که در غیر این صورت قبل از وقوع واکنشهای همجوشی ساچمه به صورت مکانیکی منفجر شده و ذرات آن پراکنده می گردند. برای داشتن بهرهٔ انرژی واحد (یا اصطلاحا سر به سر شدن انرژی خروجی از رآکتور با مقدار ورودی به آن) در این مدت چگالی پلاسمای سوخت بایستی به مقداری حدود LHD ۱۰۰۰ بالغ گردد. همچنین یک شیوهٔ جایگزین برای پرتودهی با باریکه های لیزری پرتودهی توسط باریکه های ذرات یونی تولیدی توسط شتابدهنده می باشد. علیرغم تمام کوششهای فراوان علمی و اقتصادی به عمل آمده در گسترهٔ جهانی بایستی یادآور شد که هنوز هم بمب هیدروژنی آزمایش شده در ۱۹۵۴ اولین وسیلهٔ ساخت بشر بر اساس همجوشی به روش محبوس سازی با استفاده از خاصیت لختی می باشد که از بهرهٔ انرژی بالاتر از یک برخوردار بوده است!

در هر دوی روشهایی که بشر برای تقلید فرآیند همجوشی در ستارگان جهت تولید انرژی با موازنهٔ مثبت به آنها دست یازیده و مورد اشاره قرار گرفتند دو ویژگی مشترک به چشم می خورد که یکی نیاز به ایجاد و محبوس سازی پلاسما باچگالی لازم و دیگری گرم کردن به حد کفایت هسته ها جهت وقوع همجوشی بین آنها می باشد. از طرفی رسیدن به این دو ویژگی برقراری شرایط سختی را طلب می کند

(جدول م-۱) که با وجود وقف حدود چهار دهه وقت و همچنین اختصاص سرمایه هایی کلان جهت تحقیقات و آزمایش در این زمینه هنوز با نتیجهٔ مطلوب فاصلهٔ زیادی باقی مانده است. در اینجا این سوالها پیش می آیند که آیا روش دیگری وجود ندارد که در آن احتیاج به خلق مشکل آفرین محیط پلاسما وجود نداشته باشد و نیز آیا روشی نمی توان یافت که در آن برای وقوع واکنشهای همجوشی نیازی به گرم کردن هسته ها نداشته باشیم. خوشبختانه این هر دو سوال در روش چهارم همجوشی که همجوشی از طریق محبوس سازی شیمیایی می باشد جواب مثبت یافته اند. در این روش ذرات بنیادی موئون که عامل این نوع محبوس سازی هستند بدون نیاز به گرم کردن افراطی هسته ها (و در دمایی حداکثر حدود K ۲۰۰۰) باعث همجوشی آنها می شوند. در واقع این درست شبیه به کاری است که کاتالیزکننده ها در برقراری پیوندهای شیمیایی ای که در حالت عادی برای تحقق یا تسریعشان می بایست به طرفهای واکنش گرما داده شود انجام می دهند. بدین لحاظ این روش بیشتر با عبارت همجوشیِ با موئون کاتالیز شده (یا بطور مختصر ه.مو.ک) مورد اشاره قرار می گیرد.

قبل از ورود به بحث همجوشی به روش اخیر که موضوع فصل یک می باشد انجام یک جمع بندی از بحثهای انجام گرفته ضروری به نظر می رسد. با وجود آن که اندیشهٔ یک رآکتور همجوشی خالص یعنی بدون آن که در آن شکافتی انجام بگیرد و همچنین بدون آن که در آن هسته های شکافت پذیری تولید شوند خیلی جذاب می باشد ولی با در نظر گرفتن کلیهٔ تواناییهای فعلی اصلا اقتصادی نیست. برای نمونه انرژی حاصل از یک رآکتور همجوشی گرماهسته ای خالص فقط ۴٪ مقدار مربوط به نمونهٔ دورگهٔ متناظر با آن می باشد. البته چنان که خواهیم دید این مطلب در مورد رآکتورهای مبتنی بر همجوشیِ با

جدول م-۱ شرایط فیزیکی و نوعی لازم برای همجوشی گرماهسته ای در پلاسما. با استفاده از مرجع [۶].

محبوس سازی	مغناطیسی	توسط خاصیت لختی
دما	$\cong 10^{8}$ K	———
فشار	———	$\cong 10^{9}$ atm
زمان محبوس سازی	$\cong 1$ s	$\cong 10^{-12}$ s
چگالی	$\cong 10^{-8}$ LHD	$\cong 10^{3}$ LHD

موئون کاتالیز شده نیز (البته با تفاوتهایی) صادق می باشد. بنابراین تمامی بحثهای راجع به مزیتهای انرژی ناشی از همجوشی خالص را به سختی می توان جدی گرفت.

از تمام اینها نتیجه می شود که مسألهٔ تأمین انرژی هسته ای برای آینده بدون حل مسألهٔ زایش هسته های شکافت پذیر (فرآیند (م-۳)) قابل حل وفصل نمی باشد. حل مسأله اخیر نیز با استثناء کردن مورد زایش الکتروهسته ای که موردی است متفاوت موکول می شود به تولید شاره هایی پر مایه از نوترونهای سریع توسط شیوه های مختلف. از سویی در میان شیوه های شناخته شده دو نوع مؤثر را سراغ داریم که واکنشهای همجوشی (م-۸-پ) و (م-۸-ث) می باشند در حالی که البته واکنش همجوشی (م-۸-ج) به دلیل نیاز به دو هستهٔ تریتیم مطلوب نمی باشد. از آنجایی که در ازای هر ۶۰۰۰ پروتون موجود در آب معمولی یک دوترون هم موجود می باشد و از طرفی استخراج دوترونها نیز فرآیندی است ساده لذا ادعاهای خوش بینانه ای صورت گرفته اند مبنی بر وجود اقیانوسی از انرژی که از طریق نوترونهای حاصل از واکنشهای ترکیبی مربوط به همجوشی دو دوترون (واکنش (م-۸-پ)) در دسترس می باشد. اما تمامی متخصصان تصدیق می کنند که در آیندهٔ نزدیک تنها واکنش ترکیبی مؤثر برای تولید نوترونهای سریع مربوط به همجوشی دوترون و تریتون (واکنش(م-۸-ث)) خواهد بود. لازم به تذکر است که در رآکتورهای گرماهسته ای سطح مقطع همجوشی د-ت حدودا ۱۰۰ برابر مقدار مربوط به همجوشی د-د می باشد. به علاوه همچنان که در فصل پنج خواهیم دید اکثریت قریب به اتفاق همجوشیهای روی داده به روش همجوشیِ با موئون کاتالیز شده در مخلوط دوتریم-تریتیم (که به طور کل مناسبترین مخلوط سوخت برای تمام انواع رآکتورهای همجوشی که بر اساس روشهای مختلف محبوس سازی طراحی شده اند می باشد) نیز مربوط به واکنش همجوشی د-ت می باشد.