



دانشگاه پیام نور

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته ای

عنوان پایان نامه:

انبساط همدمای پلاسمای اندر کنشی در میدان قوی لیزری در فرآیند گداخت هسته ای

استاد راهنما:

دکتر نادر مرشدیان

عضو هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

اساتید مشاور:

سرکار خانم مریم قشلاقی ، دکتر امیدرضا کاکوئی

اعضای هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

نگارش:

فرزانه نکونام

اردیبهشت ۱۳۸۹

تتقییم به:

پیر و مادر مهربانم که در تمام مراحل زندگی پشوانه و یاور من بوده اند.

چکیده:

هدف این پایان نامه، شناخت انبساط پلاسما و تحلیل نظری و تجربی آن در زمینه واکنش های گداخت به روش محصور سازی اینرسی (ICF) می باشد. برای حصول این هدف، انبساط پلاسما بر اساس توصیف سیالی و معادلات حرکت و پیوستگی مورد مطالعه قرار گرفته است. این معادلات در رژیم همدمایی در مختصات کروی حل شده است. با استفاده از رهیافت خود تشابهی و تغییر متغیر های مناسب معادلات نهایی برای حل عددی ساده شده است. نمودار تغییرات چگالی با مقدار های مختلف ثابت جدایی رسم شده و همچنین نمودار تغییرات شعاع و توان نیز با شرط همدمایی نشان داده شده است.

فهرست:

۶	..... پیشگفتار
۷	..... فصل اول-گذاخت هسته ای
۷	..... مقدمه
۱۰	..... (۱-۱) تاریخچه ای از دستگاه های گذاخت
۱۳	..... (۱-۱-۱) استلراتور.....
۱۴	..... (۲-۱-۱) توکاماک
۲۱	..... (۳-۱-۱) دستگاه تنگش Z
۲۲	..... (۴-۱-۱) دستگاه تنگش θ
۲۳	..... (۵-۱-۱) پلاسمای کانونی (PF)
۲۶	..... (۶-۱-۱) گذاخت لیزری
۲۷	..... فصل دوم-گذاخت به روش محصور سازی اینرسی (ICF) (گذاخت لیزری)
۲۷	..... مقدمه
۲۹	..... (۱-۲) طرح های بین المللی ($SHIVA, NOVA, NIF, HIPER$)
۳۳	..... (۲-۲) سیستم های لیزری در فرآیند ICF
۳۷	..... (۳-۲) اندرکنش لیزر نانو ثانیه با ماده.....
۴۰	..... (۴-۲) اندرکنش لیزر پیکو ثانیه با ماده.....
۴۱	..... (۵-۲) تحلیل انرژی یون های تولید شده در رژیم فمتو ثانیه.....
۴۵	..... (۶-۲) اشتعال سریع با پرتوهای قوی پروتون.....
۵۰	..... (۷-۲) هدف های غیر مستقیم در اشتعال سریع پلازما.....

۵۱	..... ۱-۷-۲) طراحی کپسول گداخت تک بعدی.....
۵۳	..... ۲-۷-۲) پیکربندی هولورام.....
۵۶	..... ۸-۲) پیشرفت در طراحی هدف های (ICF) در اشتعال سریع با یون های سنگین.....
۶۰	..... فصل سوم-مطالعه انبساط پلازما از دیدگاه سیالی.....
۶۰	..... ۱-۳) پارامترهای پلازما.....
۶۳	..... ۲-۳) توصیف سیالی.....
۶۷	..... فصل چهارم-تحول پلازما در فرآیند همدمای.....
۶۷	..... مقدمه.....
۶۷	..... ۱-۴) انبساط همدمای پلاسمای اندرکنشی با لیزر.....
۷۸	..... ۲-۴) تحلیل انرژی یون ها.....
۷۹	..... ۳-۴) تابع موج رقیق کننده در رژیم همدمای اندرکنشی با لیزر در رژیم نانو ثانیه.....
۸۴	..... بحث و نتیجه گیری.....
۸۶	..... مراجع.....

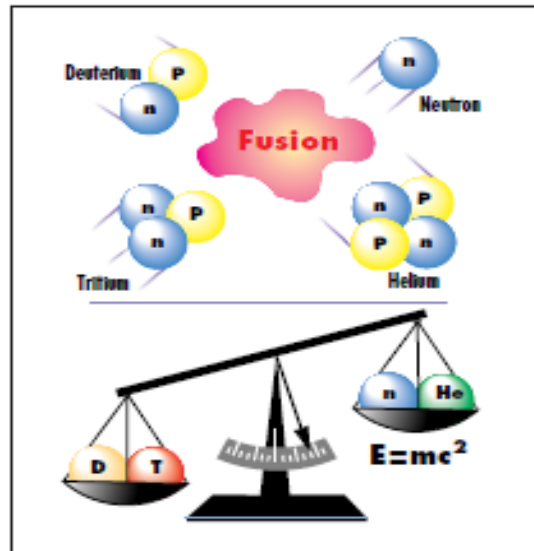
پیشگفتار:

همان طور که می دانیم در فرآیند گداخت هسته ای از همجوشی دو هسته سبک یک هسته سنگین ایجاد می شود. دو روش اساسی در زمینه گداخت هسته ای، محصور سازی مغناطیسی و محصور سازی لیزری است. در این پایان نامه انبساط پلاسمای همدمای اندرکنشی در میدان قوی لیزری در فرآیند گداخت هسته ای را مورد بررسی قرار می دهیم. در فصل اول این پایان نامه تاریخچه ای از دستگاه های گداخت را معرفی نموده و سپس دستگاه های نامزد در رآکتور گداخت را بررسی می کنیم. سپس در فصل دوم آزمایش های گرما هسته ای در زمینه گداخت لیزری در پروژه های **SHIVA, NOVA, NIF, HiPER** معرفی می شود. متعاقباً اندرکنش لیزر با پلاσμα در رژیم نانو ثانیه و پیکو ثانیه بررسی می گردد. همچنین به وجود آمدن اشتعال سریع با پرتو های قوی پروتون و طراحی و توسعه و پیشرفت های آن را با یون های سنگین مطالعه نمودیم. در فصل سوم با معادلات پیوستگی و حرکت پلاσμα در چارچوب دیدگاه سیالی آشنا می شویم و معادلات مورد نیاز را به دست می آوریم. در فصل چهارم معادلات انبساط پلاσμα پرداخته شده و نمودارهای چگالی و تغییرات شعاعی و توان که با کد کامپیوتری شبیه سازی شده در رژیم همدمایی مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد..

فصل اول - گداخت هسته ای

مقدمه

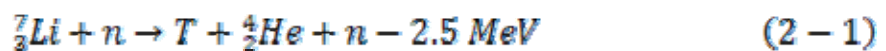
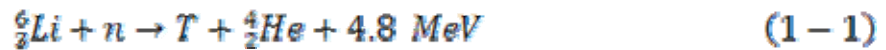
گداخت فرآیندی است که به طور طبیعی در خورشید و ستارگان رخ می دهد. در فرآیند گداخت هسته ای هسته های سبک مانند هیدروژن، دوتریم و تریتم با یکدیگر همجوشی داده شده و هسته های سنگین تر و مقداری انرژی تولید می شود. در این فرآیند مقداری از جرم هیدروژن به انرژی تبدیل می شود. واکنش گداخت با ترکیب شدن دوتریم (هیدروژن سنگین) و تریتم (هیدروژن بسیار سنگین) ایجاد می شود و سپس هلیوم و نوترون به وجود می آید. (شکل ۱-۱)



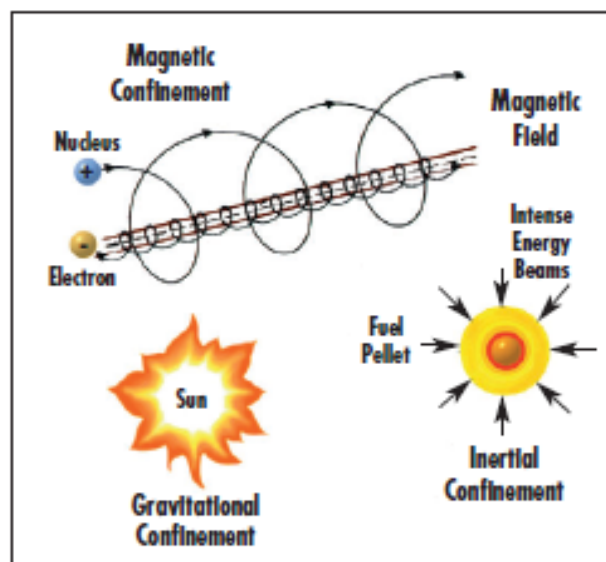
شکل ۱-۱) واکنش گداخت هسته ای

دوتریم در آب معمولی به مقدار بسیار فراوان وجود دارد. و تریتم هم می تواند توسط ترکیب نوترون گداخت با فلز سبک فراوان لیتیم تولید شود. فراوانی ایزوتوپ دوتریم در هیدروژن طبیعی، برابر با یک در ۶۷۰۰ است. وزن آب اقیانوس ها برابر است با $1.4 \times 10^{21} kg$. در نتیجه میزان دوتریم موجود در آن $1.4 \times 10^{16} kg$ می باشد. در رآکتور های $D - T$ با راندمان حرارتی ۱.۳، میزان تولید انرژی عبارت است از $(4 \times 10^{16} / m_d)(17.6/3) MeV$ ، این مقدار با $10^{22} GJ$ انرژی الکتریکی برابری می کند و تقریباً

3×10^{11} برابر مصرف انرژی الکتریکی سالانه جهان است. بنابراین بدیهی است که مشکلی در مورد منابع دوتریم نخواهیم داشت. وضعیت در مورد تریتیم متفاوت است. تریتیم نیمه عمر کوتاهی در حدود 12.3 سال دارد، بنابراین نمی تواند به طور طبیعی وجود داشته باشد. اما تولید آن از طریق لیتیم با بهره گیری از نوترون های واکنش های گداخت امکان پذیر است یعنی؛



فراوانی طبیعی ایزوتوپ های ${}^6_3\text{Li}$ و ${}^7_3\text{Li}$ ، به ترتیب 7.4 و 92.6 درصد است. به این ترتیب سوخت های اصلی گداخت دو عنصر دوتریم و لیتیم می باشند. برای ایجاد گداخت اتم های هیدروژن باید دارای انرژی جنبشی کافی باشند تا بر میدان الکتروستاتیکی بین هسته ها غلبه کرده ، بنابراین باید در دمای بسیار بالا (۱۰۰ میلیون درجه) گرم شوند در نتیجه در این دما یونیزه شده، به شکل پلازما در می آمده و انرژی کافی برای ترکیب را پیدا می کنند و واکنش گداخت اتفاق می افتد. خورشید و ستارگان این عمل را با نیروی گرانشی انجام می دهند. روش های کاربردی در این زمینه محصور سازی مغناطیسی و محصور سازی اینرسی است. (شکل ۱-۲ را ببینید) که در ادامه به تفصیل در مورد آن بحث خواهد شد.



شکل ۱-۲) فرایند های محصور سازی (مغناطیسی و اینرسی)

دانشمندان بیش از ۴۰ سال است که برای ایجاد گداخت بر روی زمین تحقیق کرده اند. اگرچه گداخت فرآیند هسته ای است اما محصولات واکنش گداخت (هلیوم و نوترون) رادیو اکتیو نیستند و با طراحی درست می توان یک دستگاه مولد نیروی گداخت به طور ایمن تولید کرد بدون این که هیچ پسماند رادیو اکتیو با نیمه عمر طولانی تولید شود [7].

در این فصل ابتدا به تاریخچه ای از گداخت هسته ای می پردازیم و سپس دستگاه های نامزد گداخت هسته ای و روشهای محصور سازی را به ترتیب بررسی می کنیم و در پایان به گداخت لیزری که موضوع اصلی بحث ما است می پردازیم.

منشاء تحقیقات گداخت

چگونه و چه طور خورشید می درخشد و ستارگان چشمک می زنند؟ این ها سوالاتی هستند که همیشه در ذهن بشر وجود داشته است. برای مدت زمان طولانی عقیده بر این بود که درخشش خورشید توسط سوزاندن مواد خودش صورت می گیرد. گرچه زمین شناسان در نیمه اول قرن نوزدهم بر این باور بودند که خورشید قادر است صدها هزار سال سوخت پدیده های مهم روی زمین را تأمین کند ولی طبق نظر **Lord Kelvin** و **Helmholtz** خورشید می تواند ۲۰ میلیون سال از طریق نیروی گرانشی، انرژی تولید کند. در حقیقت **Lord Kelvin** در مقابله با نظریه تحول **Darwin**، معتقد بر این بود که زمان کافی برای این پدیده وجود ندارد.

اولین سرنخ در چگونگی عملکرد ستارگان در معادله اینشتین ($E = mc^2$) است که حاصل از نظریه نسبیت او در سال ۱۹۰۵ بود. در معادله معروف اینشتین پیش بینی شده بود که مقدار ناچیزی از جرم می تواند به مقدار زیادی از انرژی تبدیل شود. قانون نسبیت اینشتین در قرن نوزدهم توسط **von Helmholtz** و **Mayer** بسط یافت که شامل تبدیل جرم به انرژی بود. در سال ۱۹۱۹ **Henry Norris Russell** اخترشناس برجسته در ایالات متحده به طور خلاصه به سرشت طبیعی منبع انرژی ستارگان اشاره کرد. **Russell** دمای بالای درون ستارگان را سرنخ مهمی می دانست.

همچنین در سال ۱۹۲۰ **Francis William Aston** با ارائه راه حل آزمایشگاهی معما را کشف کرد. او جرم اتم های مختلف را به صورت دقیقی اندازه گیری کرد که از جمله آن ها هیدروژن و هلیوم بود و دریافت

که ابتدا چهار هسته اتم هیدروژن و سپس هسته اتم هلیم سنگین تر هستند. اهمیت اندازه گیری های **Aston** به واسطه تشخیص فوری **Arthur Eddington**، متخصص انگلیسی فیزیک نجوم بود. **Eddington** در سال ۱۹۲۰ برای نتیجه علمی در مورد اندازه گیری های **Aston** که اختلاف جرم بین چهار اتم هیدروژن و هلیم در خورشید بود، دلیل آورد و بیان کرد که خورشید به واسطه تبدیل اتم های هیدروژن به هلیم می تواند بدرخشد. در فرآیند سوزاندن هیدروژن در هلیم (طبق معادله $E = mc^2$) در حدود **0.7%** از جرم به انرژی تبدیل می شود. در اصل این موضوع به خورشید اجازه می دهد که برای ۱۰۰ میلیون سال بدرخشد. در سال ۱۹۳۹ **Hanse Bethe** شروع تئوری کمی ایجاد گداخت انرژی را در ستارگان (به انضمام خورشید) توصیف کرد [7].

۱-۱) تاریخچه ای از دستگاه های گداخت

اولین نتایج گداخت در سال ۱۹۳۰ در لابراتوار **Cavendish** در کمبریج انگلیس انجام شده بود. اما ادامه نتایج را دانشمند برجسته **Lord Rutherford** در سال ۱۹۳۳ پیش برد. بعد از جنگ جهانی دوم و پروژه مهم **Manhattan**، که اولین سلاح های هسته ای توسعه پیدا کرده بودند علاقه و انگیزه در خصوص انرژی اتمی و گداخت افزایش یافت. همچنین در تمام جهان علاقه جدی وجود به استفاده صلح آمیز از فیزیک گداخت داشت. در انگلیس اکثر فعالیت های اولیه توسط دانشگاهها انجام می شد که بیشتر گروه **George Thomson** در کالج امپراطوری و تیم **Peter Thoneman** در آکسفورد عهده دار آن بودند. گروه **Thomson** حتی حق ایجاد یک رآکتور گداخت را اخذ کرده بودند. در سال ۱۹۵۲ فیزیکدانان، یک دستگاه تنگش ماریپیچی کوچک را ایجاد کردند. اما در طی سال های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ فیزیک دانان انگلیسی یک وسیله گداخت آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ در **Harwell** ساختند و آن را **Zero Energy Toroidal Assembly (ZETA)** نامیدند. **ZETA**، یک دستگاه تنگش ماریپیچی بود و از ۱۹۵۴ تا ۱۹۵۸ به کار گرفته شد. این نتایج شروعی برای برای ساخت دستگاه های بزرگتر بود.

در آمریکا، **Lyman Spitzer** در لابراتور فیزیک پلاسما پرینستون فعالیت خود را در خصوص دستگاه محصور سازی مغناطیسی، که استلراتور نامیده می شد، شروع کرد. **James Tuck**، فیزیک دان انگلیسی در **Los Alamos National Laboratory** فعالیت بر روی دستگاه تنگش مغناطیسی را آغاز نمود و

Lawrence Livermore Laboratory ، کار بر روی بمب هیدروژن را در **Edward Teller**

ادامه داد که شامل تکنیک های محصور سازی اینرسی می شد، ادامه داد. در ابتدا تمام این پروژه های ملی در خفا نگه داشته شده بود، اما در سال ۱۹۵۶ در دیدار رهبران شوروی (**Nikita Khrushchev**) و بلغاری ها در انگلیس، تلاش برای انجام این پروژه ها در جهان را علنی نمودند. همچنین در کشورهای دیگری چون فرانسه و آلمان تحقیقات گداخت شروع شده بود.

همکاری بین المللی و تبادل اطلاعات علمی بین کشور ها و تحقیقات گداخت برای کنفرانس صلح در سال ۱۹۵۸ در ژنو آغاز گردید. در انگلیس، ساخت آزمایشگاه اختصاصی در **Culham**، همچنان راهبرد ایجاد

Joint European Torus (JET) را پیش می بردند. تقریباً ۱۰ سال بعد (سال ۱۹۶۸) ، **Tamm** و **Sakharov** دانشمندان روسی نتایجی را بیان کردند که نوع جدیدی از وسیله ی محصور سازی مغناطیسی بود و توکاماک نامیده می شد. این موضوع یک حرکت عظیم را سبب شد. این آزمایش در دمایی ۱۰ برابر بیشتر (۱۰ میلیون درجه سانتی گراد) نسبت به هر جایی دیگر در جهان و با نتایج محصور سازی عالی به کار گرفته شده بود [7]. موفقیت روس ها توسط دیدار دانشمندان انگلیس، در سال ۱۹۶۹ محرز شده بود و ساخت توکاماک های بیشتر و چگونگی روشهای غالب برای تحقیقات گداخت همچنان پیش می رفت.

همچنین در سال ۱۹۷۸ پروژه **JET** در اروپا راه اندازی و در سال ۱۹۸۳ به کار عملی شد و توکاماک ژاپنی **JT-60** در سال ۱۹۸۵ کاربردی گردید و در سال ۱۹۹۱، **JET** در جهان مقدار قابل توجهی توان (۱٫۷ **MW** یا ۱٫۷ میلیون وات) را از واکنش های گداخت هسته ای به روش محصور سازی مغناطیسی ایجاد کرد. در سال ۱۹۹۳ راکتور آزمایشی گداخت توکاماک (**TFTR**) در پرینستون توان **10MW** با پلاسما مخلوطی از دوتریم و تریتیم (۵۰/۵۰) تولید کرد. در سال ۱۹۹۷، رکورد جهانی ثبت شده **JET** برای تولید توان گداخت **16MW** بود. تمام این ها و آزمایشات توکاماک های دیگر که در جهان طراحی شده است، پیش نیاز پروژه **ITER** در گام بعدی تاریخچه گداخت بود.

دستگاه های گداخت و معرفی روش های محصور سازی

وقتی گاز دوتریم (یا مخلوط دوتریم - تریتیم) تا دمای زیاد گرم شود، اتم ها یونیده می شوند، گاز حاصل متشکل از ذرات داغ یونیده را پلاسما می نامند. برای افزایش احتمال برخورد بین یون ها که می تواند به

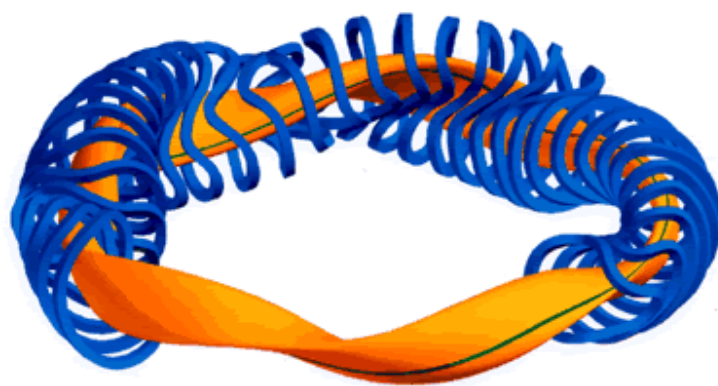
همجوشی بیانجامد، پلاسما باید سه شرط داشته باشد: (۱) چگالی زیاد (n) به طوری که احتمال برخورد ذرات زیاد باشد، (۲) دمای زیاد T در گستره $10^8 K$ که احتمال نفوذ ذرات را در پتانسیل کولنی متقابل زیاد کند و (۳) زمان محصور سازی طولانی τ که در خلال آن باید بالا بودن دما و چگالی حفظ شود. پارامترهای اول و سوم را می توان با استفاده از ملاحظات کلی، بر اساس توان لازم برای گرم کردن پلاسما (که با چگالی n متناسب است) و توان حاصل از همجوشی ها در پلاسما ها (متناسب با $n^2 \tau$) با هم ترکیب کرد. برای این که توان همجوشی بیش از توان ورودی باشد، حاصل ضرب $n\tau$ باید از یک مقدار کمینه بزرگتر باشد. این شرط عبارتست از معیار لاسون؛

$$n\tau \geq 10^{20} \text{ s.m}^{-3} \quad (3-1)$$

توانایی پلاسما در تولید انرژی از طریق همجوشی را می توان با مقدار پارامتر لاسون $n\tau$ و دمای T مشخص کرد. دافعه الکتریکی ذرات یونیده در پلاسما تمایل به دور کردن آن ها از یکدیگر و راندن آن ها به دیواره محفظه دارد، که بر اثر برخورد با اتم های سردتر دیواره، انرژی از دست می دهند. برای حفظ چگالی و دما دو روش ابداع شده است: محصور سازی مغناطیسی (*Magnetic confinement fusion*) که از میدان های مغناطیسی قوی برای تنظیم حرکت ذرات استفاده می شود و محصور سازی لختی (*Inertial confinement fusion*). در محصور سازی لختی، پلاسما به وسیله تابش لیزر با چنان سرعتی گرم و متراکم می شود که قبل از این که سوخت بتواند منبسط و سرد شود همجوشی صورت می گیرد. همان طور که گفتیم در فرآیند واکنش گرما هسته ای کنترل شده، فرآیند جلوگیری از برخورد پلاسما با دیواره های ظرفی که در آن جای دارد، محصور سازی نام دارد. زمان تقریبی برای آن که یون ها توسط میدان احاطه کننده به دام افتاده باقی بماند زمان محصور سازی نام دارد. دستگاه های نامزد گداخت هسته ای در محصور سازی مغناطیسی عبارتند از: استلراتور، تنگش Z ، تنگش θ ، پلاسما ی کانونی و توکاماک. در زیر به معرفی هر کدام از این دستگاه ها می پردازیم.

۱-۱-۱) استلاراتور

پیشنهاد ساخت استلاراتور در اوایل سال ۱۹۵۱، توسط *Lyman spitzer* در دانشگاه پرینستون ارائه شد. یکی از روش های ساده برای محصور کردن پلاسما استفاده از میدان مغناطیسی قوی در یک چنبره است. هدف از ایجاد استلاراتور ها نگهداری یون ها با میدان مغناطیسی است. برای این منظور، نیاز به وجود میدان های مغناطیسی چنبره ای و قطبی بود. میدان های چنبره ای حرکت ذرات باردار را در امتداد خطوط میدان دایره ای نگاه می دارند، در صورتی که خطوط میدان قطبی ذرات را در بسمت محور نگاه می دارند. استلاراتور ها میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچ های خارجی را کاملاً انباشت می کنند. طراحی و ساخت سیم پیچ ها در استلاراتور ها نسبت به توکاماک ها شکل پیچیده تری دارند. استلاراتور ها به طور ذاتی بدون استفاده از سیستم محرک جریان قادر به حفظ پیکر بندی محصور سازی هستند، در صورتی که برای توکاماک ها این جریان لازم است. روش های جدید در ساخت استلاراتور های بزرگتر و کارایی برابر با توکاماک ها ابداع شد. محققان دریافتند که محصور کردن پلاسما بدون جریان زیاد از پلاسما می تواند برای به کار انداختن رآکتور گداخت مقرون به صرفه باشد و همچنین پایداری پلاسما را افزایش می دهد. در اروپا دو پروژه استلاراتور ساخته شده است: *TJII* استلاراتوری در اسپانیا و *W7-AS* در آلمان است. *TJII* استلاراتوری است که راه اندازی شده است و *W7-X* استلاراتور بزرگتری است و زمان راه اندازی آن سال ۲۰۱۱ است [8]. شکل (۱-۳) استلاراتور *W7-X* نشان می دهد.



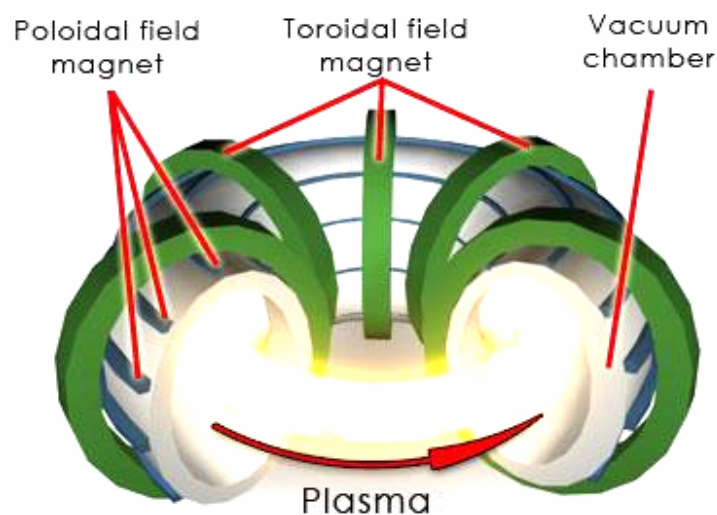
شکل ۱-۳) محصور سازی مغناطیسی در استلاراتور *W7-X*

استلراتور $W7-X$ دارای میدان 3 تسلا، دمای $(T = 6 \times 10^6 \text{°K})$ میلیون درجه کلوین، بیشترین شعاع آن $5.5m$ ، زمان دشارژ آن در حدود 30 دقیقه و حالت پایه آن با گرمایش RF است که با $5-30$ میلی گرم ماده کار می کند.

استلراتور **Laege Helical Device (LHD)** یکی دیگر از بزرگترین استلراتورها در جهان است. این استلراتور در **Nagoya** ژاپن واقع شده است و در سال ۱۹۹۸ راه اندازی شد. شعاع پیچه اصلی در **LHD** برابر با $3.9m$ است و ماکزیمم میدان مارپیچی 6.9 تسلا است. نتایجی که در **LHD** گزارش شده است به این صورت می باشد: $T_e = 10 \text{ keV}$ (دمای الکترون ها)، $T_i = 13.5 \text{ keV}$ (دمای یون ها)، و زمان محصور سازی برابر با 0.36 s است [8].

۱-۱-۲) توکاماک

توکاماک یکی از انواع رآکتور های همجوشی هسته ای است. طرح توکاماک در دهه پنجاه میلادی توسط روسها پیشنهاد شد. توکاماک از کلمات **toroidalnaya kamera and magnitnaya** گرفته شده است (سرواژه عبارت روسی به معنای "اتاقک مغناطیسی چنبره ای"). شکل (۴-۱) نمایی از میدان ها در توکاماک را نشان می دهد.



شکل (۴-۱) شمائی از توکاماک

در توکاماک ها دو میدان مغناطیسی وجود دارد. سیم پیچ ها به طور هموار به دور ستون ها قرار دارند که میدان مغناطیسی چنبره ای قوی ایجاد می کنند در حالی که جریان الکتریسیته در پلاسما خود میدان قطبی ضعیفی را به وجود می آورد. میدان برآیند شبیه خطوط میدان مارپیچی دسته های یک طناب است. میدان مغناطیسی می تواند پلاسما را محصور کند زیرا ذرات باردار به صورت مارپیچ حول خطوط مغناطیسی حرکت می کنند. اتم های یونیده که میدان مغناطیسی آنها را به دام افکنده است، چنبره را دور می زنند. پیچه های توکاماک یک میدان مغناطیسی در امتداد محور چنبره تولید می کنند. مولفه دیگر میدان جریان را در امتداد محور به وجود می آورد. دو مولفه میدان با هم ترکیب و خطوط میدان مارپیچی شکل را به وجود می آورند. که این دو مؤلفه میدان یکی **Troidal** (چمبره ای) و دیگری **Poloidal** (قطبی) نام دارد. جریان پلاسما به وسیله حرکت ذرات باردار تولید می شود و پلاسما گرم می شود. در توکاماک بوسیله بانک خازنی بزرگی تخلیه الکتریکی صورت می گیرد و پلاسمای گاز نمونه از طریق تخلیه به وجود می آید.

ضریب پایداری بتا (β)

بتا راندمان محصور سازی، نسبت فشار سیالی پلاسما به فشار مغناطیسی است و با رابطه زیر بیان می گردد:

$$\beta = \frac{p}{B^2/2\mu_0} \quad (4-1)$$

که در این جا p فشار سیالی پلاسما و B میدان مغناطیسی و μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی است. مقدار قدرت گرما هسته ای در یک میدان مغناطیسی معین در رآکتور از اهمیت خاصی برخوردار است. آهنگ واکنش گداخت با $n^2\langle\sigma v\rangle$ که σ سطح مقطع برخورد و v سرعت یون ها است متناسب می باشد و معمولاً نمی توان آن را بر حسب فشار بیان کرد. اما در دامنه مقادیر دمایی معمول در رآکتور یعنی $10 - 15 \text{ KeV}$ ، $\langle\sigma v\rangle$ تقریباً با T^2 متناسب است. بنابراین قدرت گرما هسته ای با p^2 متناسب خواهد بود. پس می توان شکل دیگری از β را با β^* به صورت زیر نمایش داد:

$$\beta^* = \frac{(\int p^2 d\tau / \int d\tau)^{1/2}}{B_0^2/2\mu_0} \quad (5-1)$$

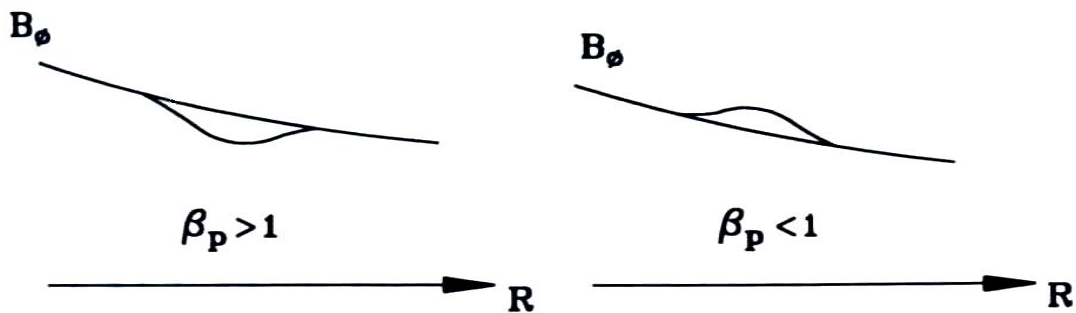
انتگرال گیری روی حجم پلاسما صورت می گیرد و البته این مقدار میدان مغناطیسی چنبره ای، در پیچه های محصور کننده می باشد که با محدودیت روبروست. شکل معمول بتا که کاربرد بیشتری دارد، مقدار میانگین آن است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\langle \beta \rangle = \frac{\int p d\tau / \int d\tau}{B_0^2 / 2\mu_0} \quad (6-1)$$

بتای قطبی، عبارت دیگری برای بتاست و به شکل زیر تعریف می شود:

$$\beta_p = 1 + \frac{1}{(aB_{\theta a})^2} \int_0^a \frac{dB_{\phi}^2}{dr} r^2 dr \quad (7-1)$$

همان طور که مشاهده می شود اگر هیچ جریان سمتی وجود نداشته باشد، عبارت زیر انتگرال معادله فوق مساوی صفر است و در نتیجه داریم $\beta_p = 1$. اگر داشته باشیم $dB_{\phi}^2/dr > 0$ میدان چنبره ای بخشی از محصور سازی فشار را بر عهده خواهد داشت. پس داریم $\beta_p > 1$ و از سوی دیگر اگر $dB_{\phi}^2/dr < 0$ فشار مغناطیسی $B_{\phi}^2/2\mu_0$ مقداری از فشار پلاسما را جبران می کند و در نتیجه $\beta_p < 1$ می شود. این مطلب در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱) نمایه β_p در حالات $\beta_p > 1$ و $\beta_p < 1$

هم اکنون پیشرفت های چشمگیری در زمینه دست یابی به مقادیری از دما، چگالی، و زمان محصور سازی نزدیک به پارامتر های لازم برای ساخت یک نیروگاه قدرت صورت گرفته است. به ویژه در سال های اخیر دانشمندان، مهندسان و طراحان از نقاط مختلف جهان تحت پوشش پروژه های عظیمی همگام شده اند. توکاماک **JET** و پروژه **ITER** نمونه هایی از سرمایه گذاری هنگفت در این زمینه به شمار می آیند.

- توکاماک **JET**

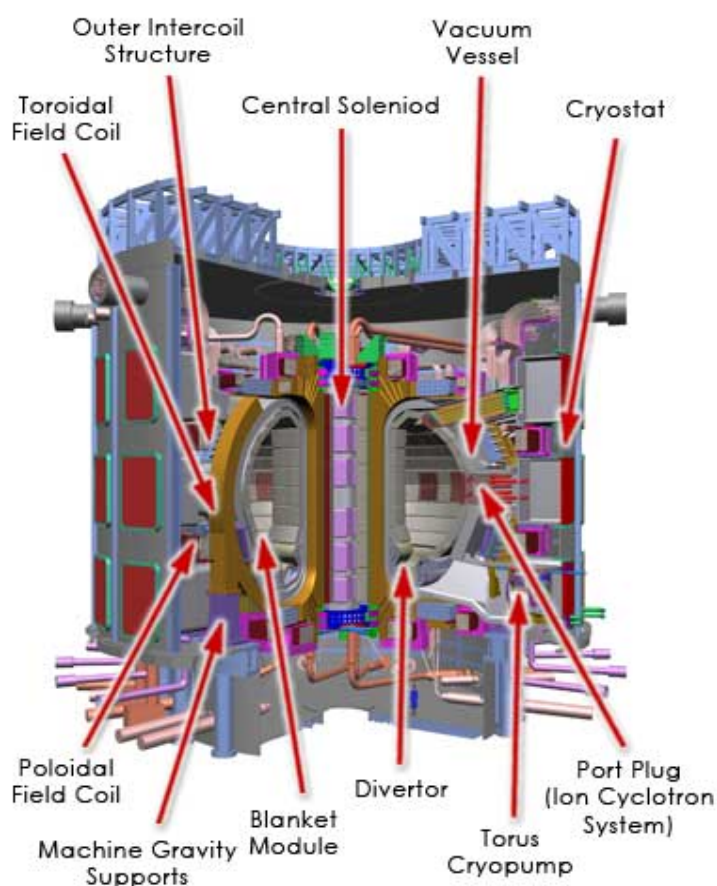
توکاماک **JET** ، توکاماکی است که با همکاری چند کشور اروپایی، تحت پوشش سازمان انرژی اتمی اروپا ساخته شد. جت نخستین پروژه بین المللی از این نوع می باشد. در این توکاماک جریان پلاسمایی در حدود **3 – 5MA** جاری است. این مقدار بیشتر از جریان لازم برای محصور سازی ذرات آلفای حاصل از گداخت می باشد. طراحی این توکاماک با روش مرسوم تفاوت دارد. محفظه خلاء آن با نسبت ظاهری کم، مقطعی **D** شکل دارد و از هشت قطعه تشکیل شده است. پیچه های میدان چنبره ای نیز به شکل **D** هستند. هر قطعه شامل چهار پیچه می باشد که در کنار یکدیگر در سراسر طول محفظه جای گرفته اند. تمام حلقه های میدان قطبی و میدان کنترلی، در خارج از پیچه های میدان چنبره ای واقع شده اند. به این ترتیب گردآوری دستگاه و اتصال پیچه ها همزمان صورت نمی گیرد. هسته مولد الکتریکی متشکل از هشت یوغ آهنی فشرده است. مقدار کل شار نوسانی تولیدی در حدود **32** وبر می باشد [5]. بر همین اساس گرمایش پلازما از طریق گرمایش تشدید سیکلوترونی یون **JCRH**، با قدرتی در حدود **15MW** انجام می شود. علاوه بر این تزریق باریکه ذرات خنثی با قدرت **10MW** مورد استفاده قرار می گیرد. در این توکاماک در صورت دسترسی به شرایط مناسبی از پلازما، در مخلوط دوتریم و تریتیم می توان به گرمایش قابل ملاحظه ای از ذرات آلفا دست یافت. در این حالت با مسئله پرتو زایی و سایر اجزاء در بر گیرنده آن روبرو هستیم. مرحله نخست راه اندازی توکاماک با گرمایش اهمی، جریان بالایی از پلازما در حدود **5MA** مورد بهره برداری قرار گرفتند در این حالت زمان محصور سازی انرژی به مقدار بیش از **0.9s** در چگالی پلاسمایی در حدود $3.5 \times 10^{19} m^{-3}$ رسید. این مقدار **5** مرتبه از معیار لازم برای اشتعال کمتر است. البته انتظار می رود با به کار گیری روش های دیگری از گرمایش، دما و چگالی پلازما از مقادیر یاد شده تجاوز کند. جدول (۱-۱) پارامتر های توکاماک **JET** را نشان می دهد:

جدول (۱-۱) پارامتر های توکاماک **JET**

نام دستگاه	سال	شعاع اصلی (m)	شعاع محدودکننده (m)	میدان چنبره ای (T)	B_{max} (T)	جریان پلازما (MA)	$n\tau$ ($10^{20} s/m^3$)	KT (KeV)	نوع مولد یوغ الکتریکی
JET	1983	3.0	0.25	3.5	2.8	3.0	0.5	5	آهن

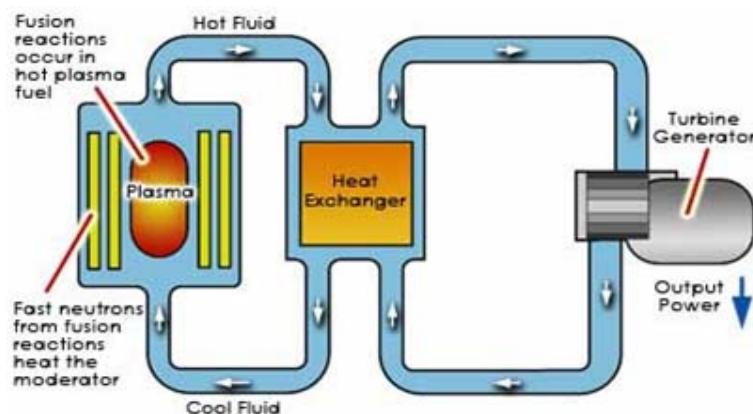
– توکاماک *ITER*

رآکتور گرما هسته ای (*ITER International Thermonuclear Experimental reactor*) یک پروژه مشترک بین اتحادیه اروپا، سوئیس، ژاپن، روسیه، آمریکا، چین و کره است، شکل (۶-۱) را ببینید. روش اجرای کار با هم ارزی $Q = 1$ و رسیدن $Q > 10$ نشان داده می شود. Q نسبت توان های خروجی به ورودی در حجم بزرگی از پلاسما است و واکنش های گداخت برای حالت های جریان نیمه آرام برقرار می شود. توکاماک ایتر پلاسما چنبره ای با شعاع داخلی $2m$ و شعاع خارجی $6.2m$.



شکل (۶-۱) رآکتور توکاماک *ITER* با معرفی بخش های اصلی

بخش های اصلی راکتور ایتر عبارتست از: مخزن خلاء، تزریق کننده باریکه خنثی (سیستم سیکلوترونی)، سیستم پیچیده های میدان مغناطیسی (قطبی یا چنبره ای)، ترانسفورماتور ها، وسیله خنک کننده، روکش مدول ها و منحرف کننده ها، شکل (۶-۱).



شکل ۱-۷) شمای رآکتور گداخت

توان مورد نیاز برای شروع واکنش گداخت در حدود **70MW** است، و بازده توان در نتیجه واکنش ها در حدود **500MW** است و زمان واکنش های گداخت از **300s** تا **500s** طول خواهد کشید [9]. روکش های لیتیوم خارج از اتاقک واکنش پلاسما، نوترون های پر انرژی حاصل از گداخت را جذب خواهد کرد و روکش ها نیز تنها به وسیله نوترون ها گرم می شوند. گرما انتقال یافته به وسیله حلقه خنک کننده آب در تبادل گرمایی بخار تولید می کند. بخار توربین های الکتریکی را به حرکت در خواهد آورد و جریان برق تولید می شود. بخار آب در جذب مقدار زیادی گرما از رآکتور و تبادل گرما به طرف عقب فشرده خواهد شد، شکل (۷-۱). بعضی از خصوصیات طرح توکاماک ایتر که با پشتیبانی آژانس بین المللی انرژی اتمی و همکاری چهار کشور شرکت کننده اصلی - ایالات متحده، اتحادیه اروپا، روسیه و ژاپن انجام گرفته بود عبارت بودند از یک حجم بزرگ پلاسما تقریباً بیضی شکل، یک پوشش برای جذب انرژی نوترون و یک انحراف دهنده برای خارج کردن انرژی ذرات باردار تولید شده و خاکستر هلیم. پارامتر های انتخاب شده در جدول (۲-۱) آورده شده است: