

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه اصفهان

دانشکده‌ی علوم و فناوری‌های نوین

گروه مهندسی هسته‌ای

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی هسته‌ای گرایش
گداخت هسته‌ای

بررسی روش رشته جریان در توکامک و تعیین شار مغناطیسی در توکامک دماوند

استادان راهنما:

دکتر محمدحسین استکی

دکتر یحیی صادقی

پژوهشگر:

رسول قدیری قهدریجانی

مهرماه ۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه
اصفهان است.



دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم و فناوری‌های نوین
گروه مهندسی هسته‌ای

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای
گرایش گداحت هسته‌ای آقای رسول قدیری
قهدریجانی تحت عنوان

بررسی روش رشته جریان در توکامک و تعیین شار مغناطیسی در توکامک دماوند

در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۳۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر محمدحسین استکی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر یحیی صادقی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر ایرج جباری با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر محمدرضا عبدی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

پروردگار را شاکرم که مرا در مسیر کسب علم و دانش قرار داد و در این راه لطف بی دریغش را شامل حالم ساخت و با سپاس و قدرانی فراوان از استاید فرهیخته ام جناب آقای دکتر استکی و جناب آقای دکتر صادقی که از فضایل و علم این عزیزان بسیار آموختم و از دوستان مکتبی خود جناب آقای مهندس شیرانی و جناب آقای مهندس رسولی که هر دو عزیز دروان تحصیل دکتری خود را سپری می کنند، تشکر می نمایم که اگر راهنمایی های این عزیزان در ابتدای این راه نبود بنده هرگز نمی توانستم آن قدمی را بردارم که در رویای خود به سر داشتم و همچنین از جناب آقای دکتر عبدی و جناب آقای دکتر جباری که همیشه حامی حقیقی بنده بوده و هستند، تشکر می نمایم.

همچنین از دوستان خوبم رضا جعفری، امیر بهشتی، محمد فروزش، ابولفضل کنعانی، خداداد اکبری و محمد پور عبدالله که دو سال پر از خاطره را با آنها پشت سر گذاشتم تشکر می نمایم.

در پایان از تمامی عزیزانی که به بنده یاری رسانند تا این راه به سرانجام برسد تشکر و قدردانی می نمایم.

این اثر را با افتخار تقدیم می کنم به

پدر مهربانم

که همیشه مرا حمایت کرده

و به

مادر عزیزتر از جانم

که دعای خیرش همیشه بدرقه راهم بوده و هست.

چکیده

تعیین شکل و موقعیت پلاسما که با محاسبه‌ی شار مغناطیسی صورت می‌پذیرد یکی از مهمترین مراحل کنترل پلاسما در توکامک‌ها است. روش رشته جریان به دلیل توانمندی در محاسبه‌ی دقیق شار مغناطیسی با استفاده از محاسبه‌ی ممان‌های جریان و همچنین سرعت محاسبه بالا به دلیل استفاده از روش‌های جبر خطی راهکار مناسبی است. محاسبه شار مغناطیسی با استفاده از این روش به صورتی است که معادله تعادل پلاسما در توکامک (معادله گراد-شفرانف) به صورت غیر مستقیم حل می‌شود. در این روش، پلاسما و کلیه‌ی پیچ‌هایی که در آن‌ها جریان الکتریکی وجود دارد، به صورت رشته‌هایی از جریان در نظر گرفته می‌شوند. با محاسبه شار مغناطیسی حاصل از هر یک از این رشته‌ها می‌توان به شار مغناطیسی کل و در نتیجه شکل و موقعیت پلاسما پی برد. در همین راستا مقادیر شار ناشی از رشته جریان‌ها توسط تابع گرین محاسبه شود. علاوه‌براین در بخشی از محاسبات معکوس این تابع مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای محاسبه‌ی آن از روش تجزیه مقدار منفرد استفاده می‌شود. محاسبه‌ی ممان‌های جریان آخرین مرحله‌ای است که برای کامل شدن فرآیند مدل‌سازی پلاسما به منظور تعیین مرز پلاسما انجام می‌شود. در این پژوهش با بکارگیری روش رشته جریان به محاسبه‌ی شار مغناطیسی در توکامک دماوند پرداختیم. مدل ساخته شده به خوبی مرکز پلاسما و همچنین آخرین سطح مغناطیسی بسته که مرز پلاسما است را محاسبه می‌کند. اولین خطای مدل، مربوط به جریان پلاسما است که اختلاف مقادیر واقعی در مقایسه با مقادیر به دست آمده از مدل را نشان می‌دهد که این خطا کمتر از ۳٪ است. دومین خطای مدل، مربوط به شناساگرهای مغناطیسی است که مقدار متوسط این خطا برای هر شناساگر کمتر از ۰/۰۴٪ است. نتایج به دست آمده از مدل، ما را در انجام یک فرایند کنترل دقیق یاری می‌رساند. در واقع می‌توانیم با استخراج یک ماتریس ضرائب از قلب محاسبات، مرز پلاسما را با استفاده از یک ضرب ماتریسی ساده در ماتریس مربوط به داده‌های ورودی که با استفاده از شناساگرهای مغناطیسی به دست می‌آید، محاسبه کنیم. انجام این مدل‌سازی این اجازه را خواهد داد که مرز پلاسما را در کمتر از ۱ میلی‌ثانیه و با استفاده از یک کامپیوتر معمولی با پردازشگر اینتل کُر ۲ ۴/۴ گیگا هرتز محاسبه کنیم.

واژگان کلیدی:

توکامک، پلاسما، روش رشته جریان، ممان جریان، تجزیه مقدار منفرد، تابع گرین

فهرست مطالب

| صفحه | عنوان |
|---------|---|
| | فصل |
| ۱..... | اول: کلیات..... |
| ۱..... | ۱-۱- مقدمه..... |
| ۲..... | ۲-۱- گداخت هسته ای..... |
| ۳..... | الف- گداخت گرما هسته ای به روش محصور سازی مغناطیسی..... |
| ۳..... | ب- گداخت گرما هسته ای به روش محصور سازی لختی..... |
| ۳..... | ۳-۱- توکامک..... |
| ۵..... | ۴-۱- مگنتوهیدرودینامیک..... |
| ۷..... | ۵-۱- تعادل..... |
| ۸..... | ۵-۱-۱- معادله گراد- شفرانف..... |
| ۱۱..... | ۵-۱-۲- ضریب ایمنی، (q) |
| ۱۲..... | ۵-۱-۳- بتا..... |
| ۱۴..... | ۶-۱- اندازه گیری مغناطیسی..... |
| ۱۴..... | ۶-۱-۱- حلقه شار..... |
| ۱۶..... | ۶-۱-۲- حلقه زینی شکل..... |
| ۱۶..... | ۶-۱-۳- پیچهای میرنف..... |
| ۱۶..... | ۶-۱-۴- پیچهای روگوفسکی..... |
| ۱۷..... | فصل دوم: توکامک دماوند..... |

| | |
|----|---|
| ۱۷ | ۱-۲-مقدمه..... |
| ۱۷ | ۲-۲-پیچه‌های میدان چنبره‌ای..... |
| ۱۸ | ۳-۲-پیچه‌های میدان قطبی..... |
| ۲۰ | ۴-۲-سیستم ایجاد خلأ و تزریق گاز..... |
| ۲۲ | ۵-۲-سیستم یونیزاسیون اولیه..... |
| ۲۲ | ۶-۲-ابزارهای تشخیصی..... |
| ۲۳ | ۱-۶-۲-پروب‌های مغناطیسی..... |
| ۲۵ | فصل سوم:روش رشته جریان..... |
| ۲۵ | ۱-۳-مقدمه..... |
| ۲۶ | ۲-۳-ممان‌های جریان..... |
| ۲۸ | ۳-۳-فرمولاسیون ریاضی روش رشته جریان..... |
| ۳۰ | ۴-۳-حل نمونه‌ای روش رشته جریان..... |
| ۳۳ | ۵-۳-روش تجزیه مقدار منفرد(SVD)..... |
| ۳۴ | ۶-۳-الگوریتم محاسباتی کد بازسازی مرز پلاسما در توکامک دماوند..... |
| ۳۴ | ۱-۶-۳-هندسه توکامک..... |
| ۳۵ | ۲-۶-۳-داده‌های ورودی..... |
| ۳۹ | ۳-۶-۳-مدلسازی پلاسما..... |
| ۴۴ | ۴-۶-۳-الگوریتم تشخیص مرز پلاسما با استفاده از شار مغناطیسی..... |
| ۴۶ | ۵-۶-۳-زبان برنامه نویسی کد..... |
| ۴۸ | فصل چهارم:شار مغناطیسی در توکامک دماوند..... |

| | |
|---------|--|
| ۴۸..... | ۱-۴-مقدمه..... |
| ۴۸..... | ۲-۴-بررسی میدان ناشی از پیچ‌های جریان..... |
| ۴۹..... | ۳-۴-مدل تک رشته جریان..... |
| ۵۲..... | ۴-۴-مدل ممان جریان..... |
| ۵۴..... | ۱-۴-۴-Filament Points بررسی چیدمان مختلف..... |
| ۵۸..... | ۲-۴-۴-مرز پلازما در مدل ممان جریان..... |
| ۶۰..... | ۵-۴-ارزیابی صحت مدل رشته جریان در توکامک دماوند..... |
| ۶۲..... | ۶-۴-نتیجه‌گیری..... |
| ۶۴..... | ضمیمه الف..... |
| ۷۲..... | ضمیمه ب..... |
| ۷۹..... | ضمیمه پ..... |
| ۸۷..... | منابع و مآخذ..... |

فهرست شکل‌ها

| عنوان | صفحه |
|--|------|
| شکل ۱-۱: آرایش پیچه‌ها و میدان‌های مغناطیسی در توکامک | ۴ |
| شکل ۱-۲: تغییرات شعاعی میدان مغناطیسی چنبره‌ای و قطبی و فشار پلاسما | ۴ |
| شکل ۱-۳: نمایی از محدودکننده و منحرف کننده | ۵ |
| شکل ۱-۴: دستگاه مختصات استوانه‌ای | ۹ |
| شکل ۱-۵: مسیر انتگرال‌گیری قطبی | ۱۲ |
| شکل ۱-۶: نمایه B_ϕ | ۱۴ |
| شکل ۱-۷: سیستم مختصات استوانه‌ای | ۱۵ |
| شکل ۱-۸: پروب‌های مغناطیسی | ۱۵ |
| شکل ۲-۱: نمای توکامک دماوند از بالا | ۱۹ |
| شکل ۲-۲: سطح مقطع توکامک دماوند | ۱۹ |
| شکل ۲-۳: نمایش پیچه‌های میدان قطبی | ۲۱ |
| شکل ۲-۴: پیچه‌های میرنف در توکامک دماوند | ۲۳ |
| شکل ۳-۱: سطوح شار بدست آمده از مدل رشته جریان و نمونه‌ای از خروجی XLOC | ۲۶ |
| شکل ۳-۲: نمونه‌ای از چیدمان شناساگرهای مغناطیسی به همراه رشته جریان‌ها | ۳۰ |
| شکل ۳-۳: سیگنال جریان پلاسما در شات ۲۰۰ | ۳۶ |
| شکل ۳-۴: سیگنال جریان پیچه‌های القایی، کنترلی و تعادلی در شات ۲۰۰ | ۳۶ |
| شکل ۳-۵: سیگنال جریان پیچه‌های زینی شکل در شات ۲۰۰ | ۳۷ |
| شکل ۳-۶: سیگنال پیچه‌های میرنف در شات ۲۰۰ | ۳۸ |

- شکل ۳-۷: نمایی از نقاط مجازی..... ۴۰
- شکل ۳-۸: پیچه‌های میدان قطبی دماوند ۴۱
- شکل ۳-۹: نمودار مربوط به الگوریتم نوشته شده برای مدلسازی پلاسما..... ۴۳
- شکل ۳-۱۰: نقاط مرزی برای تعیین شار مغناطیسی به منظور محاسبه مرز پلاسما..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱: نمودار مربوط به الگوریتم تشخیص مرز پلاسما ۴۶
- شکل ۴-۱: خطوط میدان ناشی از پیچه‌های القائی، کنترلی و تعادلی و همچنین پلاسما..... ۵۰
- شکل ۴-۲: خطوط میدان در ناحیه پلاسما با استفاده از مدل تک رشته جریان مربوط به شات ۲۰۰ ۵۰
- شکل ۴-۳: نقاط رشته جریان..... ۵۲
- شکل ۴-۴: خطوط میدان در ناحیه پلاسما با استفاده از مدل ممان جریان مربوط به شات ۲۰۰..... ۵۳
- شکل ۴-۵: شار مغناطیسی در راستای R ۵۵
- شکل ۴-۶: فشردگی پلاسما مربوط به شات ۲۰۰ زمانی که جریان به بیشینه می‌رسد..... ۵۵
- شکل ۴-۷: خطوط میدان با استفاده از مدل ممان جریان در زمان ۴۹/۶۰ میلی ثانیه مربوط به شات ۲۰۰. با استفاده از ۵ و ۹ رشته جریان..... ۵۶
- شکل ۴-۸: خطوط میدان و مرز پلاسما با استفاده از مدل ممان جریان در زمان ۵۲/۰۰ میلی ثانیه ۵۸
- شکل ۴-۹: مرز پلاسما ۶۰

فهرست جدول‌ها

| عنوان | صفحه |
|---|------|
| جدول ۱-۱ : معادلات MHD ایده‌آل | ۷ |
| جدول ۱-۲ : پارامترهای اصلی توکامک دماوند | ۱۸ |
| جدول ۲-۲ : مشخصه‌های الکتریکی پیچ‌های میدان چنبره‌ای | ۱۸ |
| جدول ۳-۲ : شکل، مکان و نوع پیچ‌های میدان قطبی | ۲۱ |
| جدول ۴-۲ : ابزار تشخیصی بکار رفته در توکامک دماوند | ۲۲ |
| جدول ۵-۲ : مشخصه‌ی پیچ‌های مغناطیسی | ۲۴ |
| جدول ۱-۳ : مشخصه پیچ‌های میرنف | ۳۹ |
| جدول ۱-۴ : خطای نسبی در مدل تک‌رشته‌جریان مربوط به شات ۲۰۰ | ۵۱ |
| جدول ۲-۴ : خطای نسبی در مدل ممان جریان مربوط به شات ۲۰۰ | ۵۴ |
| جدول ۳-۴ : خطای نسبی در مدل ممان جریان مربوط به شات ۲۰۰ (۵ و ۹ رشته جریان) | ۵۷ |
| جدول ۴-۴ : خطای نسبی در مدل ممان جریان مربوط به شات ۲۰۰ در زمان ۴۹/۶۰ میلی‌ثانیه (۱۲۱ رشته جریان بیضی و دایره‌ای شکل) | ۵۹ |
| جدول ۵-۴ : حداقل فاصله مرز پلاسما تا لیمیترها با استفاده از مدل ممان جریان | ۶۰ |

پیشگفتار

امروزه تامین انرژی مورد نیاز بشر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد از این رو ایجاد یک منبع انرژی تجدید پذیر و به عبارتی دیگر بی‌پایان اولین چیزی است که ذهن دانشمندان و اندیشمندان را به خود جذب می‌کند. علاوه بر این با توجه به مشکلاتی که بشر در بکار گیری انرژی‌های فسیلی به دلیل آلودگی هوا و محدودیت منابع دارد، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند چاره‌ای برای حل این بحران باشد. یکی از ایده‌های آرمانی برای حل این بحران استفاده از انرژی هسته‌ای از طریق واکنش گداخت هسته‌ای می‌باشد. از آنجایی که سوخت مورد نیاز برای انجام این نوع از واکنش از آب استخراج می‌شود و منابع آبی نیز در این کره‌ی خاکی بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند، به نظر می‌رسد که در صورت نهایی شدن طرح تولید انرژی به این طریق، می‌تواند خیال بشر را از آینده‌ی خود آسوده کند. همچنین عدم وجود آلودگی در تولید انرژی به این شیوه اهمیت نهایی شدن این فناوری را نشان می‌دهد. کار انجام شده در این پایان‌نامه قدمی بس کوتاه ولی ضروری جهت پیشرفت این فناوری در کشور عزیزمان ایران می‌باشد. در طی این پایان نامه ابتدا به طرح مباحث کلی مربوط به فیزیک پلاسما خواهیم پرداخت و پس از آن به معرفی دستگاه توکامک خواهیم پرداخت و با ارائه جزئیات مربوط به توکامک دماوند راه را برای ارائه کار اصلی یعنی محاسبه شار مغناطیسی با استفاده از روش رشته جریان در توکامک دماوند هموار می‌کنیم.

در پایان از تمامی عزیزانی که نقدی به این کار ناقابل دارند درخواست می‌نمایم جهت بهتر شدن کار این بنده حقیر در ادامه‌ی فعالیت‌های علمی خود، این نکات را گوشزد بفرمایند.

رسول قدیری

ghadiri_rasoul@yahoo.com

فصل اول

کلیات

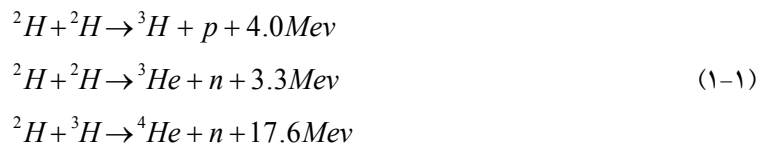
۱-۱ مقدمه

نیاز روز افزون بشر به انرژی در عرصه‌های مختلف از صنعت و کشاورزی گرفته تا نیاز برای روشنایی منازل و علم به اتمام سوخت‌های فسیلی در آینده‌ای نه چندان دور، بشر را به فکر استفاده از انرژی هسته‌ای در کنار دیگر انرژی‌ها از قبیل انرژی‌های فسیلی، برق آبی، بادی و خورشیدی انداخت به طوری که در سال ۲۰۰۸ حدود ۵/۷٪ از کل انرژی مصرفی و حدود ۱۴٪ از انرژی الکتریکی تولید شده در این کره خاکی، حاصل از انرژی هسته‌ای بوده است [۱]. اما خطری که در حال حاضر بشر را در استفاده از این انرژی تهدید می‌کند خطر ناشی از آلودگی-های هسته‌ای می‌باشد، که در اینجا می‌توان به دو فاجعه هسته‌ای یکی حادثه چرنوبیل در اوکراین در سال ۱۹۸۶ میلادی و دیگری حادثه فوکوشیما ژاپن در ابتدای سال ۲۰۱۱ میلادی اشاره کرد. در کنار این مشکلات حضور یک انرژی هسته‌ای نو ظهور از طریق گداخت هسته‌ای^۱ امیدها را برای رسیدن به یک انرژی پاکتر و ارزاتر زنده کرده است. مزایای انرژی حاصل از گداخت هسته‌ای نسبت به شکافت هسته‌ای یکی فراوانی سوخت یعنی آب و لیتیم و دیگری خطر آلودگی بسیار کمتر به دلیل نوع فرآیند هسته‌ای و همچنین نوع تکنولوژی بکار رفته می-باشد [۲]. در حال حاضر نیروگاهی که با این تکنولوژی فعالیت کند وجود ندارد ولی دستگاه‌هایی همچون توکامک^۲ JET در بریتانیا و سیستم احتراق ملی (NIF) در ایالات متحده آمریکا وجود دارند که قادر به تولید انرژی بسیار بالایی از طریق واکنش گداخت می‌باشند. پیش بینی می‌شود که متخصصین در ۱۵ سال آینده به مشکلات این تکنولوژی فایق آیند و بشر تجربه استفاده از این انرژی را نیز به دست آورد.

1 - Nuclear Fusion
2 - Tokamak

۲-۱ گداخت هسته ای

هنگامی که هسته‌های اتم‌های سبک مانند هیدروژن، هلیم، لیتیم به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شوند، از سد کولنی پیش رو عبور کرده و بر اثر نیروهای جاذبه هسته‌ای با یکدیگر ترکیب شده و ایجاد یک هسته سنگین می‌کنند که انرژی حاصل از این فرآیند برابر با تفاوت انرژی بستگی هسته سنگین با هسته‌های سبک می‌باشد و این فرآیند مادام که هسته نهایی عدد جرمی کمتر از ۶۰ داشته باشد می‌تواند ادامه داشته و انرژی آزاد کند، به این فرآیند، گداخت و یا همجوشی هسته‌ای گفته می‌شود [۲]. سه مورد از مهمترین واکنش‌های گداخت که مربوط به ایزوتوپ‌های هیدروژن هستند به صورت زیر می‌باشند:



برای آنکه یک گداخت خود نگهدار به وجود آید، توان تولیدی حاصل از گداخت باید به اندازه‌ای باشد که نه تنها توان اتلافی را جبران کند، بلکه یک توان خروجی نیز وجود داشته باشد، به همین دلیل نیاز به آن است که پلاسما دما و چگالی بسیار بالایی داشته باشد و برای مدت زمانی نیز دوام داشته باشد، این مسئله توسط معیار لاوسون^۱ بیان می‌شود. به عنوان مثال برای واکنش دوتریم-تریتیم در دمای ۱۰ کیلوالکترون ولت این شرط به صورت زیر می‌باشد

$$n\tau \geq 10^{20} m^{-3}s \quad (2-1)$$

که در اینجا n چگالی و τ زمان محصورسازی پلاسما می‌باشد. این روش از ایجاد گداخت، گداخت گرماهسته-ای نام دارد.

امروزه روش‌های متعددی برای تولید انرژی از طریق گداخت هسته‌ای مطرح شده است به عنوان مثال گداخت به روش کاتالیزور میونی، با این وجود مهمترین آن‌ها گداخت گرماهسته‌ای می‌باشد که در اینجا به دو مورد از آن اشاره می‌کنیم:

الف- گداخت گرماسته‌ای به روش محصورسازی مغناطیسی

در این روش ابتدا سوخت یونیزه و پس از آن تبدیل به پلاسما^۱ می‌شود، سپس پلاسما ایجاد شده توسط میدان-های مغناطیسی بسیار قوی محصور می‌شود و با استفاده از روش‌هایی همچون ایجاد جریان القایی در پلاسما و در نتیجه گرمایش اهمی، تزریق باریکه پر انرژی خنثی و همچنین استفاده از امواج رادیو فرکانس باعث گرم شدن آن تا دماهای بسیار بالا می‌شوند و در نتیجه شرایط را برای انجام واکنش گداخت مهیا می‌سازند[۳]. استلاتورها^۲ و توکامک‌ها با این روش کار می‌کنند.

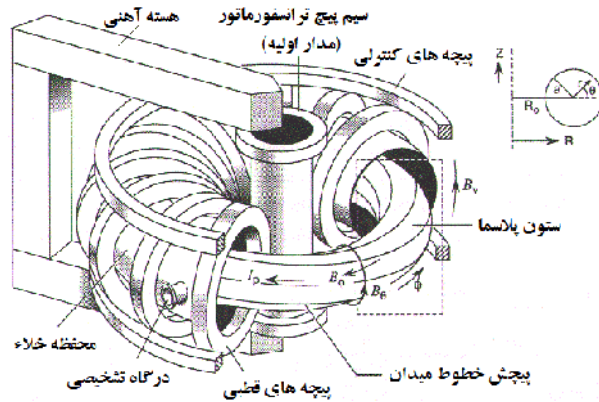
ب- گداخت گرماسته‌ای به روش محصورسازی لختی

در این روش سوخت در ساچمه‌های کروی ویژه‌ای قرار می‌گیرد و پس از آن تحت تابش متقارن باریکه‌های لیزری و یا ذرات باردار بسیار قوی قرار می‌گیرد، فشردگی بسیار زیاد حاصل از این کار شرایط انجام واکنش گداخت را ایجاد می‌کند و گداخت صورت می‌گیرد[۳]. یکی از بزرگترین دستگاه‌هایی که با این روش کار می‌کند سیستم احتراق ملی (NIF) می‌باشد.

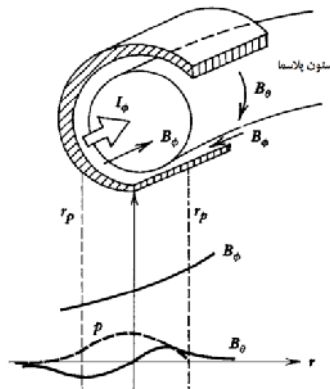
۱-۳ توکامک

واژه توکامک از سرواژه‌ی عبارت روسی به معنای "اتاقک مغناطیسی چنبره‌ای" می‌آید، در واقع توکامک دستگاه چنبره‌ای محصورسازی پلاسما است که در آن پلاسما توسط میدان‌های مغناطیسی محصور می‌شود، میدان مغناطیسی اصلی در توکامک میدان مغناطیسی چنبره‌ای است که به واسطه‌ی وجود جریان الکتریکی در پیچ‌های قطبی به وجود می‌آید، اما این میدان به تنهایی قادر به محصورسازی پلاسما نمی‌باشد، به منظور برقراری تعادل به صورتی که فشار پلاسما با نیروهای مغناطیسی متوازن شود، لازم است از وجود یک میدان مغناطیسی استفاده کرد. در توکامک این میدان معمولاً توسط جریان خود پلاسما تولید می‌شود. این جریان اغلب توسط میدان الکتریکی چنبره‌ای تولید می‌شود که در اثر تغییر شار مبدل الکتریکی در چنبره به وجود آمده است. آرایش پیچ‌ها و میدان مغناطیسی برآیند در شکل ۱-۱ و تغییرات مکانی میدان‌های مغناطیسی در شکل ۱-۲ آمده است.

1 - Plasma
2 - Stellarator



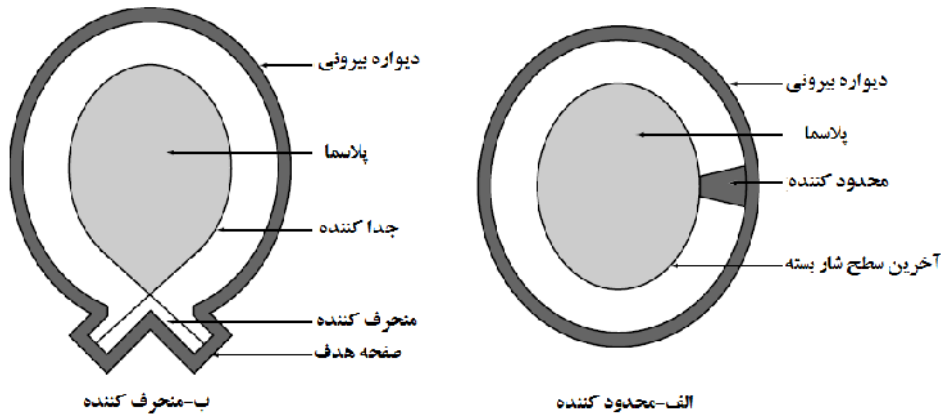
شکل ۱-۱ آرایش پیچه‌ها و میدان‌های مغناطیسی در توکامک



شکل ۱-۲ تغییرات شعاعی میدان مغناطیسی چنبره‌ای و قطبی و فشار پلاسما

برای انجام گداخت خودنگهدار نیاز به ایجاد فشار بسیار زیادی در پلاسما می‌باشد که در توکامک می‌توان با ایجاد میدان‌های مغناطیسی قوی تا حدی به این خواسته رسید ولی نکته‌ای که در اینجا وجود دارد محدودیت فنی در ایجاد میدان‌های مغناطیسی قوی می‌باشد. با توجه به تکنولوژی پیش رو میدان‌های مغناطیسی در حد ۱۲ تسلا دست یافتنی به نظر می‌رسد و برای میدانی در حد ۱۶ تسلا نیاز به اصلاحات بسیار در پیچه‌های مغناطیسی می‌باشد [۶].

به نظر می‌رسد که در مقدار معینی از میدان مغناطیسی چنبره‌ای فشار پلاسمایی که می‌توان به شکل پایا محصور کرد با افزایش جریان پلاسما تا یک مقدار حدی افزایش پیدا کند. تا کنون مقادیر بدست آمده در آزمایش‌ها در حد چندین مگا آمپر بوده است. در توکامک JET جریان‌هایی در حد ۷ مگا آمپر تولید شده‌اند در حالی که در یک راکتور مقدار جریانی در حدود ۲۰ تا ۳۰ مگا آمپر مورد نیاز است [۶].



شکل ۱-۳ نمای از محدود کننده و منحرف کننده

زمان محصور سازی در توکامک مقداری نزدیک به $\frac{1}{2}r_p^2$ می باشد که در اینجا r_p شعاع فرعی متوسط پلازما می باشد. برای مثال توکامک JET با شعاع فرعی ۱/۲۵ متر، زمان محصور سازی در حد ۱ ثانیه دارد. همچنین زمان محصور سازی با افزایش جریان پلازما طولانی تر می شود ولی متأسفانه این زمان با افزایش فشار پلازما کاهش پیدا می کند. [۶]

از آنجا که وجود ناخالصی در پلازما منجر به تلفات تابشی می شود، جلوگیری از ورود آن به پلازما، نقش اساسی در عملکرد موفقیت آمیز توکامک خواهد داشت. در این راستا، لازم است پلازما را از محفظه خلاء جدا کرد. در حال حاضر دو روش جداسازی متداول است، در روش اول از وسیله ای به نام محدود کننده^۱ برای مشخص کردن مرز خارجی پلازما استفاده می شود (شکل ۱-۳ الف)، در روش دوم، با استفاده از یک منحرف کننده^۲ مغناطیسی ذرات را از دیواره ی محفظه دور می کنند (شکل ۱-۳ ب) [۶].

۱-۴ مگنتو هیدرودینامیک

مگنتو هیدرودینامیک یا MHD، نامی است که به توصیف تک سیالی پلازما داده شده است. در این الگو از بررسی، هویت جدا گانه ای برای الکترون ها و یون ها قائل نیستیم [۶]. البته این الگو برای توصیف همه پدیده های

1 -limiter
2 -divertor

مشاهده شده در پلاسما کافی نیست ولی برای تحلیل تعادل و پایداری در یک پلاسمای محصور شده می‌تواند الگوی مناسبی باشد [۳ و ۵].

معادله بقای جرم عبارت است از

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (۳-۱)$$

ρ چگالی جرمی و \mathbf{v} سرعت سیال است، $\frac{d}{dt}$ عملگر مشتق زمانی که عبارت است از $(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla)$. گاهی سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته می‌شود و در این شرایط داریم $\frac{d\rho}{dt} = 0$ و $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$.

آهنگ تغییر سرعت از معادله حرکت به دست می‌آید

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla p \quad (۴-۱)$$

به منظور محاسبه نیروی گرادیان فشار، به معادله‌ای برای p نیازمندیم. در این خصوص، معمولا مدل ساده‌ی بی-اتلاف، با فرض رفتار بی‌دررو مورد استفاده قرار می‌گیرد، یعنی

$$\frac{d}{dt} (p \rho^{-\gamma}) = 0 \quad (۵-۱)$$

و بیانگر بقای آنتروپی است. با استفاده از رابطه بالا و ۳-۱ می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla p = 0 \quad (۶-۱)$$

با فرض تراکم ناپذیری سیال، $\nabla \cdot \mathbf{v}$ صفر می‌باشد، در حالی که $\gamma \nabla \cdot \mathbf{v}$ صفر نیست، شرط تراکم ناپذیری معادل است با حالت حدی $\gamma \rightarrow \infty$. روش مناسب در حالت فوق این است که p را از معادله ۴-۱ با در نظر گرفتن کرل معادله حذف کنیم و معادلات جدا از هم $\frac{d\rho}{dt} = 0$ و $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ حاصل از معادله پیوستگی را مورد استفاده قرار دهیم.