

خبرنامه گداخت هسته‌ای

شماره ۹

مجله تخصصی توکامک کروی



شرکت فناوری های پیشرفته ایران



شرکت فناوری های پیشرفته ایران

تلفن:

۰۲۱۸۲۰۶۴۷۰۱

نشانی: تهران، کوچه بیستم، سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوریهای پیشرفته ایران

پیش‌گفتار

هدف از تلاش جهانی در تحقیقات همجوشی این است که چشمه انرژی پاک که ستارگان را درخشان می‌کند را به زمین آورند. از زمان اولین تلاش‌ها در سال ۱۹۵۷ دانشمندان سعی در به دست آوردن دانش و درک کاملی از فیزیک پلاσμα و علم همجوشی داشته‌اند. در حال حاضر دانشمندان معتقدند گداخت هسته‌ای به عنوان روشی پاک، با ظرفیت بالا و پایدار بهترین گزینه برای تأمین انرژی مورد نیاز انسان در سال‌های آتی است. از این رو برطرف نمودن موانع علمی، فناورانه و اجرایی موجود در زمینه راه‌اندازی نیروگاه‌ها و تولید انرژی بر مبنای این واکنش در دستور کار بسیاری از مراکز علمی معتبر دنیا قرار گرفته است.

به دلیل تلاش‌های متمرکز، اولین نیروگاه تجاری شکافت درست یک یا دو دهه بعد از معرفی این مفهوم که با شکستن هسته سنگین امکانپذیر است، ساخته شد. مشابه با شکاف، در ابتدا باور بر این بود که تولید برق با استفاده از واکنش‌های همجوشی نیز در یک زمان کوتاه قابل دسترس باشد. به دلیل چالش‌های بسیار در تحقیقات همجوشی، هم اکنون باور بر این است که اولین نیروگاه تجاری گداخت زودتر از سال ۲۰۵۰ به بهره‌برداری نخواهد رسید. برای درک مشکلات در فرآیند همجوشی، افزایش قابل توجهی از تحقیقات در این زمینه از سال ۱۹۶۰ تاکنون انجام گرفته‌است. در بخش عمده‌ی این تحقیقات از میدان‌های مغناطیسی برای محصورسازی پلاسمای داغ بهره‌گرفته‌شده‌است. توکامک یک دستگاه محصورسازی مغناطیسی برای مطالعه همجوشی هسته‌ای است. مزیت این ساختار در حقیقت هندسه نسبتاً ساده پیچیده‌ها اما به قیمت پیچیدگی‌های فیزیکی از نقطه نظر پایداری پلاσμα می‌باشد. در حال حاضر تحقیقات در زمینه‌های گوناگون بر روی پلاسمای داغ در توکامک‌های جهان در حال انجام است تا به رفع موانع در راستای بهره‌برداری از اولین راکتور آزمایشی همجوشی در جهان که ایترا نام دارد، کمک نماید.

ITER

International
Thermonuclear
Experimental Reactor

یک پروژه تحقیقاتی و مهندسی بین‌المللی گداخت هسته‌ای است که هدف آن توسعه شکلی پایدار از انرژی گداخت می‌باشد. هدف ایترا امکان‌سنجی علمی فناوری گداخت به عنوان یک منبع انرژی عملی، گرم کردن پلاσμα تا دمای بسیار بالا و آغاز و حفظ یک واکنش گداخت خودپایدار است.

این پروژه شامل همکاری بین ۳۵ کشور از جمله اتحادیه اروپا، ایالات متحده، روسیه، چین، هند، ژاپن و کره جنوبی است.



چشم انداز گداخت هسته‌ای در کشور

در سال ۱۳۵۴ و اوج تحقیقات گرما هسته‌ای همجوشی در جهان، تصمیم گرفته شد تا این تحقیقات در کشور عزیزمان ایران نیز دنبال شود. در همین سال، مرکز گداخت هسته‌ای در سازمان انرژی اتمی همزمان با شروع تحقیقات گداخت در کشورهایی نظیر چین، ژاپن، کره جنوبی و هند فعالیت خود را آغاز نمود. در دهه ۵۰ شمسی سازماندهی، راه‌اندازی و مونتاژ دستگاه آمریکایی تاپینچ و در دهه ۶۰، طراحی و ساخت توکامک الوند به انجام رسید. همزمان با خرید و انتقال توکامک دماوند از مؤسسه کورچاتف روسیه و نصب آن در سازمان انرژی اتمی ایران، توکامک دیگری با نام IR-T1 توسط دانشگاه آزاد از کشور چین خریداری و در واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد تهران نصب گردید.

همچنین در راستای بهره‌وری بهینه از ظرفیت‌های تخصصی پژوهشگران و محققان کشور در حوزه فناوری‌های مرتبط با انرژی همجوشی هسته‌ای و توسعه این صنعت عظیم در کشور، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر با بکارگیری توانایی‌های علمی و فنی اعضای هیئت علمی و دانشجویان دوره دکتری اقدام به طراحی و ساخت دستگاه‌های توکامک البرز و تابان نموده‌است.

گام بعدی در زمینه گداخت به روش محصورسازی مغناطیسی با ورود شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران به عرصه گداخت هسته‌ای در زمستان ۱۳۹۶ برداشته شده است. در معاونت گداخت این شرکت، مهم‌ترین موضوع هدف‌گذاری شده در راستای توسعه فناوری گداخت هسته‌ای، انجام پروژه بومی‌سازی ساخت توکامک کروی است. گزارش حاضر اولین مجموعه از گزارش‌های علمی مربوط به توکامک کروی می‌باشد که در آن به بررسی شبیه‌سازی پلاسمای توکامک کروی پرداخته شده است.



توکامک دماوند
(سازمان انرژی اتمی ایران)



توکامک الوند
(سازمان انرژی اتمی ایران)



توکامک IR-T1
(واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد)



دعوت به همکاری

شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران به عنوان متولی اصلی گداحت هسته‌ای در کشور با تصویب پروژه "بومی‌سازی طراحی توکامک کروی" در مسیر دستیابی به دانش و تکنولوژی ساخت ماشین توکامک بومی و سامانه‌های جانبی آن گام بسیار مهمی برداشته است. در این راستا یکی از اهداف اصلی معاونت گداحت توسعه بستر نرم‌افزاری مناسب جهت شبیه‌سازی یکپارچه پلاسمای توکامک می‌باشد که فعالیت‌های مهمی در این مسیر انجام گرفته است. همچنین این شرکت در نظر دارد با بهره‌گیری از توان و ظرفیت دانشگاه‌ها، مراکز علمی و پژوهشی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و شرکت‌های دانش بنیان طرح‌های مشترک در حوزه شبیه‌سازی یکپارچه پلاسمای توکامک را تعریف و اجرا نماید.



((خواهشمند است نظرات و پیشنهادات ارزشمند خود را با ما در میان بگذارید))

fusion_ati@aeoi.org.ir

۰۲۱-۸۲۰۶۴۷۰۱

فهرست مطالب

۱	پیش‌گفتار
۲	چشم‌انداز گداخت هسته‌ای در کشور
۵	ماشین توکامک
۶	تاریخچه توکامک کروی
۸	مقدمه بر شبیه‌سازی پلاسمای توکامک کروی
۱۰	مسئله تعادل در ماشین توکامک
۱۱	شبیه‌سازی تعادل مرز ثابت
۱۳	توکامک کروی هدف گذاری شده
۱۴	نتایج شبیه‌سازی تعادل مرز ثابت در توکامک هدف
۱۶	شبیه‌سازی تعادل مرز آزاد در توکامک هدف
۲۹	شبیه‌سازی ترابرد در توکامک هدف

تاریخچه توکامک کروی

تحقیقات در زمینه توکامک‌های کروی یک شاخه‌ی منشعب شده از پژوهش‌های توکامک‌های مرسوم است. در سال ۱۹۸۰، محققان آزمایشگاه ملی oak ridge در ایالات متحده به ویژگی‌های قابل توجهی از توکامک‌ها با نسبت منظر پایین شامل پلاسمای پایدار و وقوع ناپایداری‌های کمتر (در مقایسه با توکامک‌ها با نسبت منظر بالا) دست یافته‌اند.

دستاوردهای تجربی دهه‌ی ۱۹۹۰،

توکامک‌های کروی را کانون توجه

و تحقیق دانشمندان گداخت

هسته‌ای قرار داده است.



پلاسمای توکامک کروی

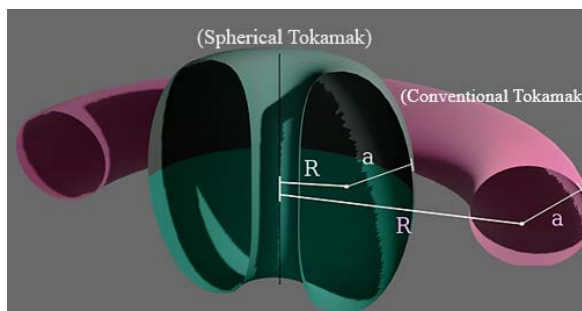
START

ماشین توکامک

توکامک یکی از انواع ماشین‌های گداخت هسته‌ای است که به عنوان اصلی‌ترین نامزد دستیابی به انرژی گداخت هسته‌ای مطرح می‌گردد. این ماشین ابتدا توسط دانشمندان اتحاد جماهیر شوروی طراحی و سپس در سال ۱۹۵۸ در مؤسسه کورچاتف شوروی اولین توکامک دنیا ساخته شد. از نظر ساختار فیزیکی و هندسه، توکامک‌ها به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

- توکامک مرسوم (Conventional Tokamak)
- توکامک کروی (Spherical Tokamak)

در پلاسمای توکامک، کمیت نسبت منظر به صورت $A=R/a$ تعریف می‌شود که در آن R و a به ترتیب شعاع بزرگ و کوچک پلازما هستند. توکامک کروی عضوی از خانواده توکامک‌ها می‌باشد که نسبت منظر آن به کمتر از ۲ کاهش یافته است (بسیار کمتر از محدوده‌ی عملکرد توکامک مرسوم با نسبت منظر بیش از ۲٫۵). از مشخصه‌های این توکامک، طبیعت بسیار فشرده و کشیدگی طبیعی پلازما است که منجر به پایداری بالای پلازما می‌گردد. در ساختمان هندسی توکامک‌ها، پلازما داخل یک محفظه خلاء دونات شکل تولید، گرم و نگهداری می‌شود. در توکامک کروی، ابعاد حفره مرکزی این دونات تا حد امکان کاهش می‌یابد و در نتیجه شکل پلاسمایی تقریباً کروی ایجاد می‌کند. در مقایسه با توکامک‌های مرسوم، این ماشین‌ها فشرده‌تر بوده و بتای بالاتری، نسبت فشار پلازما به فشار مغناطیسی، را فراهم می‌کنند. بتای بالاتر به این معنا است که جهت دستیابی به فشار پلاسمای یکسان، فشار مغناطیسی پایین‌تری مورد نیاز می‌باشد. این امر منجر به کاهش هزینه‌های ساخت و هزینه‌های عملیاتی ماشین می‌شود.



مزیت‌های توکامک کروی

توکامک‌های کروی دو مزیت بزرگ نسبت به توکامک‌های مرسوم دارند.

مزیت اول: در این توکامک‌ها، پیچه‌های مولد میدان مغناطیسی چنبره‌ای بسیار نزدیک به پلاσμα است. این نزدیکی پیچه به پلاσμα باعث می‌شود تا با انرژی صرف شده کمتری در سیم‌پیچ‌ها، میدان لازم تولید شود. این امر باعث کوچکتر شدن پیچه‌ها و کاهش قیمت ساخت می‌گردد.

مزیت دوم: در این توکامک‌ها عموماً ضریب ایمنی پلاسمای تولیدی بالاست و لذا تا محدوده وقوع ناپایداری‌ها که در حوالی ضریب ایمنی ۲ الی ۳ اتفاق می‌افتد، فاصله زیادی وجود دارد. این امر باعث می‌شود تا ذرات زمان زیادی را در شعاع‌های کوچک که دارای کیفیت محصورسازی بالاتری است، صرف کنند و لذا پایداری پلاسمای تولیدی در توکامک‌های کروی بالاتر از توکامک‌های مرسوم می‌باشد.

تاریخچه توکامک کروی

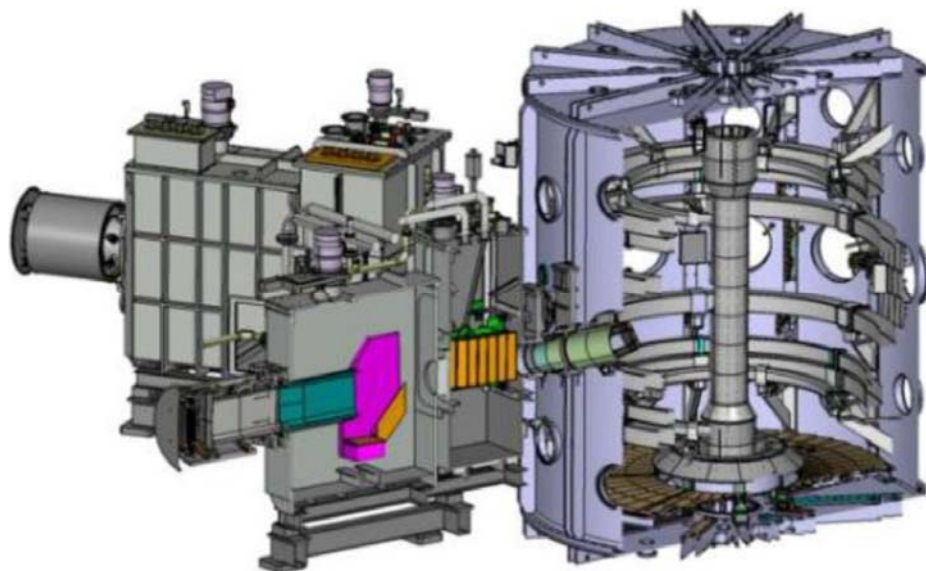
در حال حاضر، مراکز تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های بسیاری جهت طراحی، ساخت و بهره‌برداری از توکامک‌های کروی در سراسر جهان وجود دارد. از این میان، START اولین توکامک کروی موجود در جهان می‌باشد که ساخت آن در سال ۱۹۹۰ آغاز و در ژانویه ۱۹۹۱ در انگلستان شروع به کار کرد. توکامک‌های NSTX در پرینستون آمریکا و MAST در کالهام انگلستان، بزرگترین تاسیسات عملیاتی در جهان می‌باشند. تنها توکامک کروی که میدان محوری آن توسط پیچه‌های ابرسانا تامین می‌گردد، ST-40 نام دارد و در مراحل اولیه بهینه‌سازی و آزمایش عملکرد قرار دارد.

انگلستان، آمریکا، روسیه و ژاپن جزء کشورهای پیشرو در تحقیقات گداخت هسته‌ای با استفاده از توکامک‌های کروی محسوب می‌شوند. در جدول زیر لیست توکامک‌های کروی فعال در سراسر جهان به همراه مشخصات اصلی آن‌ها آورده شده‌است.

نام توکامک	شعاع اصلی (m)	شعاع فرعی (m)	میدان مغناطیسی (T)	جریان پلاσμα (MA)	نسبت منظر	مکان نصب
MAST	0.85	0.65	0.5	1.4	1.4	UK
MAST-U	0.85	0.65	0.84	1.4	1.4	UK
ST40	0.4		3	2	1.7	UK
NSTX-U	0.934	0.6	1	2	1.5	USA
Globus-M	0.36	0.24	0.65	0.5	1.5	Russia
Medusa-CR	0.14	0.1	0.5	0.04	1.4	Costa Rica
GUTTA	0.16	0.08	1.5	0.15	1.9	Russia
GLAST	0.2	0.1	0.4	0.05	2	Pakistan
ST25	0.25	0.12	0.2	0.02	2	UK
LATE	0.25	0.2	0.12	0.004	1.25	Japan
ETE	0.3	0.2	0.8	0.44	1.5	Brazil
CPD	0.3	0.2	0.3	0.15	1.5	Japan
SUNIST	0.3	0.23	1.15	0.05	1.3	China
START	0.32	0.26	0.4	0.25	1.2	UK
UTST	0.39	0.24	0.3	0.31	1.6	Japan
LTX	0.4	0.27	0.4	0.4	1.5	USA
Pegasus	0.45	0.375	0.18	0.3	1.2	USA
QUEST	0.68	0.4	0.25	0.02	1.7	Japan
KTM	0.9	0.45	1	0.75	2	Kazakhstan

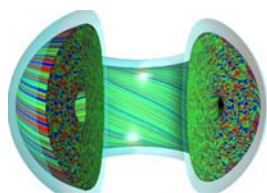
تقریباً هریک از توکامک‌های کروی ساختار منحصر بفردی از قبیل شکل میدان‌ها، نحوه قرارگیری سیم پیچ‌های میدان‌های قطبی، محفظه خلاء و غیره دارند. به عنوان مثال توکامک‌هایی که پایه آن‌ها روسی یا آمریکایی است معمولاً از سامانه گرمایش سیکلوترونی یونی و باریکه خنثی استفاده می‌کنند، در حالیکه توکامک‌هایی که ساخت انگلستان هستند سامانه‌های تزریق باریکه خنثی، مهم‌ترین سامانه‌های گرمایشی برای آن‌ها می‌باشد و سیم پیچ‌های مولد میدان قطبی در داخل محفظه نصب شده‌اند. در این میان توکامک‌های ژاپنی بیشتر از سامانه‌های گرمایشی سیکلوترونی الکترونی استفاده می‌کنند.

از میان توکامک‌های کروی موجود در جهان، توکامک‌های MAST و NSTX ارتقاء یافته، بزرگترین و پیشرفته‌ترین توکامک‌های کروی دنیا محسوب می‌شوند و جزء توکامک‌های پیشرو در تحقیقات گداخت هسته‌ای در ساختار کروی می‌باشند. همچنین توکامک MAST دارای ظرفیت بالقوه در دستیابی به جریان پلاسمای بالا در حالت ارتقاء یافته می‌باشد. لذا با توجه به ظرفیت علمی و فنی مهندسی کشور و با تکیه بر توان متخصصین و پژوهشگران و با استفاده از کلیه امکانات و زیرساخت‌های داخلی، توکامک کروی MAST به عنوان توکامک الگو انتخاب و توسط متخصصین جمهوری اسلامی ایران در دست طراحی و ساخت می‌باشد.

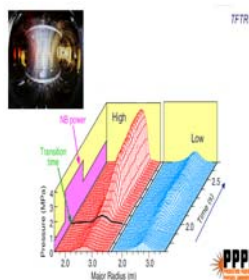




توکامک‌های کروی در مقایسه با توکامک‌های معمول محصورسازی بهتری را از خود نشان می‌دهند.



انحنای و اغتشاشات در خطوط میدان فقط بوسیله شبیه‌سازی ژایروکینتیک مشاهده می‌گردد.

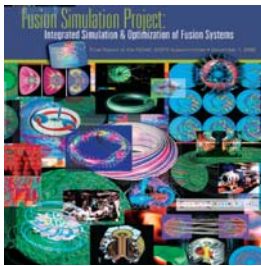


دو رژیم با محصورسازی متفاوت با شرایط اولیه یکسان همراه با تزریق باریکه خنثی.

مقدمه بر شبیه‌سازی پلاسمای توکامک کروی

یکی از بخش‌های بنیادی در طراحی، ساخت و پیش‌بینی رفتار پلاسمای توکامک، دستیابی به ابزار شبیه‌سازی است. این ابزار در مرحله طراحی، با هدف پیش‌بینی ساختار، اصلاح و بهینه‌سازی سیستم به کار می‌رود. در حالت کلی، ابزاری که قبل از ساخت یک توکامک می‌تواند صحت طراحی و عملکرد آن را به طور تئوری تأیید کند و به عنوان یک پشتیبان علمی برای طراحی توکامک مورد استفاده قرار گیرد، ابزار شبیه‌سازی پلاسمای است. بعد از ساخت توکامک نیز این ابزار برای پیش‌بینی نتیجه آزمایش و همچنین طراحی آزمایشی که به یک نتیجه خاص منجر گردد و یا جهت تحلیل تئوری‌های موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تنوع و پیچیدگی فرآیندهای مرتبط با پلاسمای توکامک، هیچ کد جامعی وجود ندارد که تمام وجوه شبیه‌سازی توکامک را پوشش دهد. بنابراین برای بررسی هریک از مسائل مرتبط با توکامک، یک کد مجزا تدوین می‌گردد که این کدها با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف، با یکدیگر جفت شده و ارتباط منطقی بین داده‌های ورودی و خروجی هریک از این کدها با یکدیگر برقرار می‌گردد. در شبیه‌سازی توکامک، علاوه بر کدهای محاسباتی، دو نیاز اساسی دیگر نیز وجود دارد: سیستم‌های پردازش سریع و نیروی انسانی متخصص.

پروژه شبیه‌سازی پلاسمای به منظور توسعه قابلیت شبیه‌سازی جامع برای آزمایش‌های توکامک کروی پیش‌بینی شده است. به طور مثال در طراحی و ساخت توکامک کروی، توانایی ما برای پیش‌بینی عملکرد فیزیک پلاسمای در آزمایش‌های همجوشی مغناطیسی را به شدت تسریع می‌بخشد. در واقع با استفاده از نرم‌افزار جامع شبیه‌سازی عملکرد پلاسمای، می‌توان به پرسش "چگونه می‌توان یک پلاسمای همجوشی با کارایی بالا ایجاد و کنترل کنیم؟" پاسخ مناسب داد و پیشرفت‌های شگرفی در زمینه محصورسازی مغناطیسی امکان‌پذیر خواهد بود. پاسخ به این سوال اساسی، مستلزم پرداختن به وقایعی از جمله فرآیندهای غیرخطی مگنتوایدرویدینامیک که منجر به از بین بردن محصورسازی یا ایجاد اختلالات شدید پلاسمای همجوشی می‌شود، فرآیندهای لبه پلاسمای، تلاطم‌ها در مقیاس ریز پلاسمای و در نهایت چگونگی استفاده از منابع گرما، ذرات و جریان برای کنترل پلاسمای برای دستیابی به مد محصورسازی بالا می‌باشد. یکی از چالش‌های بزرگ در شبیه‌سازی پلاسمای وقوع ناپایداری‌هاست که اغلب با استفاده از کنترل منابع انرژی گرمایشی، سوخت و درایو جریان قابل کنترل هستند. با این حال در نتیجه واکنش‌های گداخت هسته‌ای، ناپایداری‌های مخرب احتمال مشکلات شدیدتر در آزمایش‌های توکامک را منجر می‌شوند. در این راستا، نرم‌افزار جامع شبیه‌سازی پلاسمای برای



پروژه شبیه‌سازی پلاسمای توکامک در اروپا با بودجه سالانه ۲۰ میلیون دلار

جلوگیری از ناپایداری‌های مخرب و در عین حال بهینه‌سازی عملکرد پلاسمای توکامک کروی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور پیش‌بینی عملکرد پلاسمای توکامک با هدف بهینه‌سازی سناریوهای عملیاتی، کنترل دقیق و بهره‌گیری از نتایج در طراحی، نیازمند بستر نرم افزاری مناسب هستیم تا امکان شبیه‌سازی تعادل، تراورد و ناپایداری‌های موجود در پلاسمای توکامک را فراهم نماید.

این گزارش، مروری است کلی بر آنچه تاکنون در معاونت گداخت شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران در زمینه شبیه‌سازی پلاسمای توکامک کروی صورت گرفته است. مدلسازی و شبیه‌سازی تعادل پلاسمای توکامک کروی در چارچوب نظریه‌ی هیدرودینامیک مغناطیسی و بررسی مسئله تراورد در ساختار چنبره‌ای ماشین توکامک، محورهای اصلی این گزارش می‌باشند. از آنجا که در پروژه "بومی‌سازی طراحی توکامک کروی" به عنوان یکی از ابرپروژه‌های شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، توکامک MAST به عنوان الگو در دستور کار قرار گرفته است، لذا کلیه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده در این گزارش بر اساس مشخصات اصلی این توکامک می‌باشد.

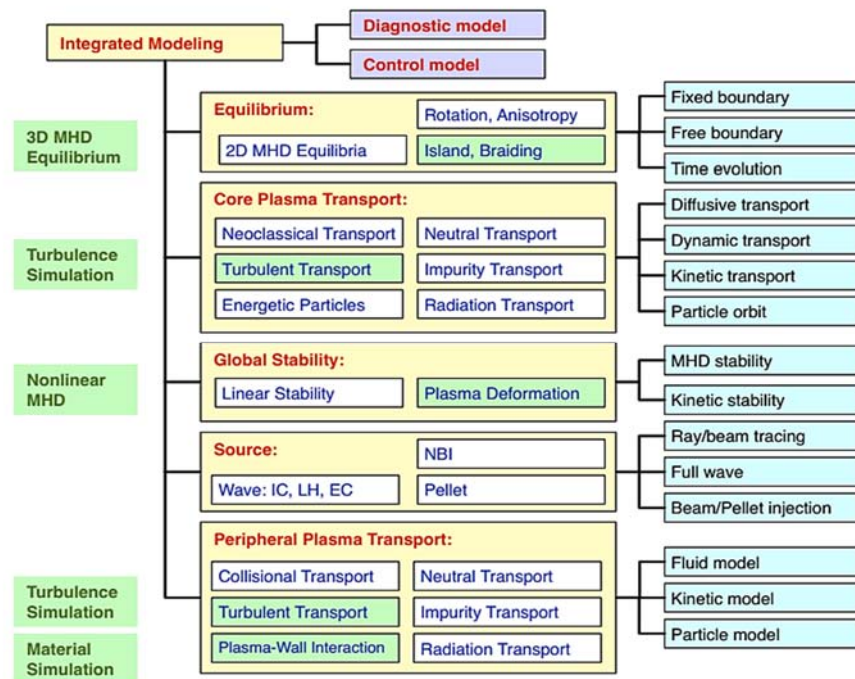
به‌طور کلی، آنچه که در گروه شبیه‌سازی پلاسمای توکامک ذیل معاونت گداخت هسته‌ای برای کد جامع در نظر گرفته شده، به قرار زیر است.



ساختار کد شبیه‌ساز جامع



مرکز محاسبات PPPL در آمریکا



مسئله تعادل در ماشین توکامک

ضرورت شبیه‌سازی تعادل

در توکامک

یکی از اصلی‌ترین مسائل روز در زمینه‌ی تحقیقات گداحت هسته‌ای، موضوع تعادل و شرایط پایداری ماکروسکوپی پلازما است. به دلیل آن که معادلات توصیف‌کننده‌ی تعادل و پایداری پلازما کاملاً غیر خطی هستند، پیدا کردن معادلات مشخصی که بتواند به‌طور کامل تعادل و پایداری پلازما را توصیف کند سخت و در بیشتر موارد غیر ممکن می‌باشد.

حل معادله تعادل از اصلی‌ترین مراحل در طراحی سیستم‌های میدان مغناطیسی قطبی است. در سال‌های اخیر، تلاش‌ها و بررسی‌های بسیاری به‌منظور توسعه کدهای MHD مرتبط با حل این معادله صورت گرفته است. تعیین قالب و ساختار تعادل MHD، بیانگر عمده‌ترین بخش در طراحی توکامک به حساب می‌آید. یکی از مهم‌ترین معادلات برای بررسی شرایط تعادل پلاسمای محصور شده، معادله گراد-شفرانف است.

برای تعادل پایا^۱، معادلات مگنتوهیدرودینامیک^۲ (MHD) موجب یک رابطه دیفرانسیلی مرتبه دوم غیر خطی می‌شود که با معادله گراد-شفرانف^۳ (GS) شناخته می‌شود. معادله‌ی گراد-شفرانف یکی از پربازده‌ترین ابزارهای توصیف تعادل پلاسمای توکامک در چارچوب نظریه‌ی هیدرودینامیک مغناطیسی است. تعادل حالت پایا که از حل معادله (GS) حاصل می‌شود، پایه و اساسی برای بررسی و ارزیابی پایداری MHD پلاسمای توکامک است. برای حل این معادله، روش‌های عددی و تحلیلی گوناگونی بکار گرفته می‌شود. به‌طور معمول، تعادل‌هایی که با استفاده از حل تحلیلی معادله گراد-شفرانف قابل توصیف هستند، محدود می‌باشند. بنابراین این معادله اغلب به صورت عددی حل می‌گردد. برای حل مسئله تعادل لازم است شرایط مرزی و شکل توابع آزاد (چگالی جریان) معرفی شده، مشخص شوند. به عبارت دیگر، معادله‌ی گراد-شفرانف، معادله‌ای غیرخطی است که با انتخاب مناسب پیکربندی چگالی جریان، امکان حل عددی و یا تحلیلی آن برای انواع ساختارها از جمله توکامک را امکانپذیر می‌سازد. برای حل معادله گراد-شفرانف دو رویکرد مورد بررسی قرار می‌گیرد:

• تعادل مرز-آزاد (Fixed boundary equilibrium)

• تعادل مرز-ثابت (Free boundary equilibrium)

در روش حلگر مرز-ثابت، مقادیر شار در مرز ناحیه محاسباتی از قبل مشخص می‌شود. درحالی‌که در حلگر مرز-آزاد، به‌طور پیوسته به محاسبه مقدار شار در مرز ناحیه محاسباتی می‌پردازد. در این حالت، سهم سیم‌پیچ‌های مغناطیسی خارجی و جریان پلازما در تعیین مرز در نظر گرفته می‌شود.

¹ Steady state

² Magnetohydrodynamic

³ Grad-Shafranov equation

شبیه‌سازی تعادل مرز ثابت

با فرض سیستم متقارن محوری، ساختار تعادلی پلازما به طور کامل با یک معادله‌ی دیفرانسیل جزئی بیضوی غیر خطی تعریف می‌شود که معادله گراد-شفرانف نام دارد. این معادله در دستگاه مختصات استوانه‌ای (R, φ, Z) عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) = -\mu_0 J_\phi = -\mu_0 R \frac{dp(\psi)}{d\psi} - \frac{1}{R} f(\psi) \frac{df(\psi)}{d\psi}$$

که در آن

- $J_\phi(\psi)$ چگالی جریان محوری کل در ناحیه پلازما،
- $f(\psi)$ تابع جریان قطبی
- $p(\psi)$ تابع فشار پلازما

از آنجا که در ماژول مرز-ثابت، مرز پلازما در محاسبات ثابت در نظر گرفته می‌شود، ضروری است شکل سطح پلازما از قبل تعریف گردد. شکل سطح پلازما به صورت زیر داده می‌شود:

$$R(\theta_1) = R_0 + a \cos(\theta_1 + \delta \sin \theta_1)$$

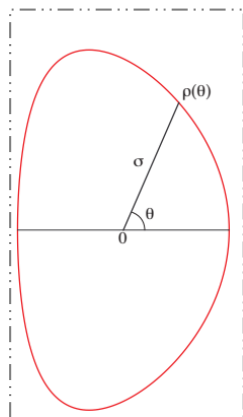
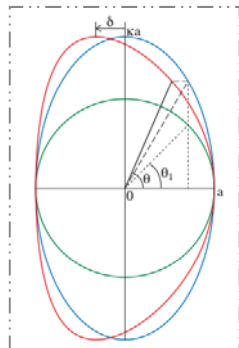
$$Z(\theta_1) = \kappa a \sin \theta_1$$

که در آن R_0 و a شعاع اصلی و فرعی و همچنین κ و δ به ترتیب پارمتر کشیدگی و مثلث‌گونگی هستند. همچنین می‌توان شکل مرز پلازما را به صورت تابعی از زاویه قطبی (θ) بیان کرد، به نحوی که:

$$\rho a(\theta) = a \sqrt{\cos^2(\theta_1 + \delta \sin \theta_1) + \kappa^2 \sin^2 \theta_1}$$

$$\tan \theta = \frac{\kappa \sin \theta_1}{\cos(\theta_1 + \delta \sin \theta_1)}$$

برای حل معادله گراد-شفرانف در شرایط مرز-ثابت ابتدا لازم است متغیرهای قطبی (θ) و (σ) تعریف شوند.



$$R = R_0 + \rho_a(\theta)\sigma\cos\theta$$

$$Z = \rho_a(\theta)\sigma\sin\theta$$

در عبارت فوق بازه‌ی تغییرات θ و σ به ترتیب عبارت است از: $0 \leq \sigma \leq 1$ و $0 \leq \theta < 2\pi$. با در نظر گرفتن تبدیل

متغیرهای زیر، معادله گراد-شفرانف برحسب متغیرهای قطبی مطابق رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\rho' = d\rho_a(\theta)/d\theta$$

$$\frac{\partial}{\partial R} = \frac{1}{\rho_a^2\sigma} [\rho'\alpha\sigma\sin\theta + \rho_a\sigma\cos\theta] \frac{\partial}{\partial\sigma} - \rho_a\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta}$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} = \frac{1}{\rho_a^2\sigma} [-\rho'\alpha\sigma\cos\theta + \rho_a\sigma\sin\theta] \frac{\partial}{\partial\sigma} - \rho_a\cos\theta \frac{\partial}{\partial\theta}$$



$$\frac{\partial}{\partial R} \frac{1}{R} \frac{\partial\psi}{\partial R} + \frac{\partial}{\partial Z} \frac{1}{R} \frac{\partial\psi}{\partial Z}$$

$$= \frac{1}{\rho_a^2\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial\sigma} \left(\frac{\sigma}{R} + \frac{\rho_a'^2\sigma}{R\rho_a^2} \right) \frac{\partial\psi}{\partial\sigma} - \frac{\partial}{\partial\sigma} \frac{\rho_a'}{R\rho_a} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial}{\partial\theta} \frac{\rho_a'}{R\rho_a} \frac{\partial\psi}{\partial\sigma} + \frac{\partial}{\partial\theta} \frac{1}{R\sigma} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \right] = -\mu_0 R \frac{dp(\psi)}{d\psi} - \frac{1}{R} f(\psi) \frac{df(\psi)}{d\psi}$$

توکامک کروی هدف گذاری شده

تاکنون توکامک‌های مختلفی در سراسر دنیا طراحی و ساخته شده‌اند. از این میان، توکامک MAST از دسته توکامک‌های کروی با ابعاد متوسط می‌باشد که در مرکز Fusion Energy کلهم انگلستان ساخته شده‌است. این دستگاه کروی از میدان‌های مغناطیسی قوی به منظور محصورسازی و کنترل پلاسمای داغ گداخت در یک محفظه‌ی دونات شکل استفاده می‌کند.

توکامک MAST برای مطالعه تعدادی از پدیده‌های گداخت، از جمله پایداری پلاسمای، کنترل پلاسمای و تولید انرژی طراحی شده‌است. علاوه بر این، توسعه فناوری‌های جدید مورد نیاز برای ساخت نیروگاه‌های تجاری گداخت در دستور کار این توکامک قرار دارد. این توکامک در سال ۲۰۰۰ راه‌اندازی شد و از آن زمان تاکنون بیش از ۵۰۰۰ آزمایش انجام داده‌است. این دستگاه به دستاوردهای قابل توجهی دست یافته است:

- رسیدن به دمای پلاسمای بیش از ۱۰۰ میلیون درجه سانتیگراد
- ایجاد پلاسمای پایدار برای مدت زمان طولانی
- آزمایش فناوری‌های جدید برای تولید انرژی گداخت

نمونه ارتقاء یافته این توکامک به نام MAST-Upgrade در سال ۲۰۲۰ شروع به کار کرد. بودجه این توکامک توسط دولت بریتانیا تأمین می‌شود. در سال ۲۰۲۳ بودجه این ماشین، حدود ۴۰ میلیون پوند بوده است که برای تأمین هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و توسعه ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

توکامک‌های کروی در مقایسه با توکامک‌های مرسوم ارزان‌تر بوده و این امر توکامک‌های کروی را به دستگاه‌های جالب‌تری برای مطالعه فیزیک پلاسمای گداخت و چشمه‌های نوترون پراثری تبدیل کرده است.

مهمترین توکامک‌های کروی که در سراسر دنیا طراحی و ساخته شده‌اند، عبارتند از:

START

[Small Tight Aspect Ratio Tokamak](#)

MAST

[Mega Amp Spherical Tokamak](#)

NSTX-U

[National Spherical Torus Experiment Upgrade](#)

Globus-M

نتایج شبیه‌سازی تعادل مرز ثابت در توکامک هدف

پارامترهای اصلی توکامک MAST که به ازای آن، شبیه‌سازی‌های تعادل مرز ثابت بررسی شده‌است، در جدول زیر آورده شده‌اند.



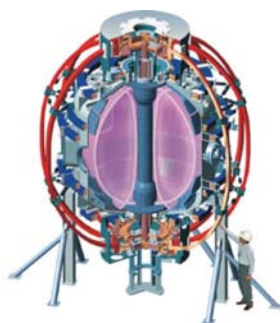
ردیف	مشخصه	مقدار
۱	شعاع بزرگ (متر)	۰٫۸۵
۲	شعاع کوچک (متر)	۰٫۶۵
۳	جریان پلازما (مگا آمپر)	۱
۴	میدان مغناطیسی چنبره‌ای (تسلا)	۰٫۶
۵	کشیدگی	۲
۶	مثلت گونگی	۰٫۳
۷	ضریب ایمنی محوری	۱٫۰۱
۸	ضریب ایمنی در سطح پلازما	۰٫۸۰

National Spherical Tokus Experiment Upgrade

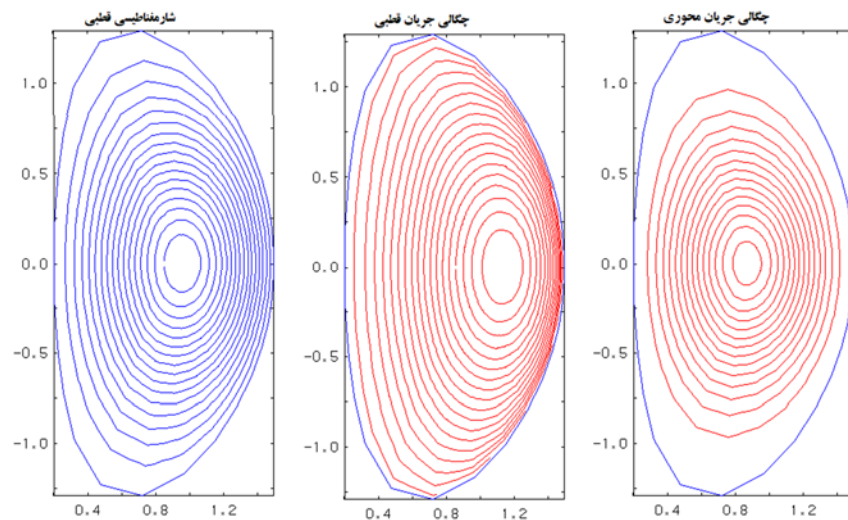
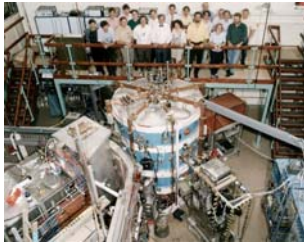
در این بخش، حل معادله‌ی گراد-شفرانف در حالت مرز- ثابت به ازای پارامترهای توکامک هدف مورد بررسی قرار گرفت. اصلی‌ترین نتایج شبیه‌سازی حلگر تعادل مرز- ثابت در دو بعد عبارتند از:

- شار مغناطیسی قطبی
- چگالی جریان محوری
- چگالی جریان قطبی

در ادامه سطوح شار تعادلی به ازای پارامترهای ورودی توکامک کروی MAST رسم شده‌اند.



Small Tight Aspect Ratio Tokamak



مقادیر بیشینه و کمینه ی مربوط به گراف های فوق به همراه فاصله بین کانتورها عبارتند از:

Globus-M



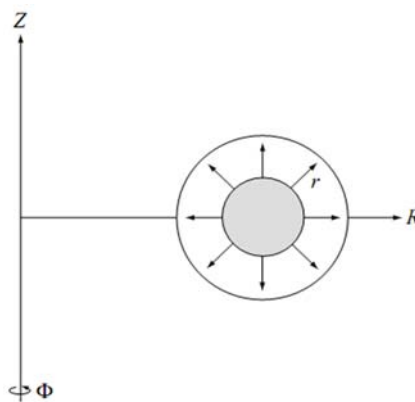
پارامتر	بیشینه	کمینه	فاصله بین خطوط
شارمغناطیسی قطبی	-3.4371E-03	-8.4202E-01	5.0000E-02
چگالی جریان محوری	1.4590E+06	702221E+02	1.0000E+05
چگالی جریان قطبی	9.4502E+00	1.6427E-01	5.0000E-01

شبیه‌سازی تعادل مرز آزاد در توکامک هدف

در ادامه به تفصیل در مورد نقش انواع میدان‌های مغناطیسی اعمالی در توکامک که تعیین مشخصات اولیه آنها خروجی تعادل مرز آزاد است، صحبت خواهد شد.

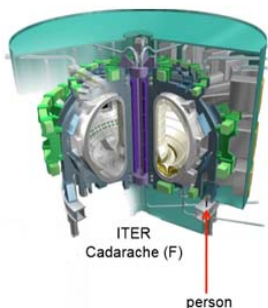
سیم‌پیچ‌های میدان مغناطیسی چنبره‌ای

ذرات در داخل پلازما به دلیل داشتن فشار جنبشی تمایل به انتشار به سمت دیواره‌های پلازما را دارند.



انبساط شعاعی پلازما در نتیجه فشار جنبشی

برای غلبه بر انتشار ذرات به دیواره از میدان مغناطیسی چنبره‌ای استفاده می‌شود تا ذرات پلازما حول خطوط میدان مغناطیسی بچرخند و از برخورد با دیواره جلوگیری شود و در نتیجه محصورسازی اتفاق بیفتد. اما به دلیل ساختار چنبره‌ای توکامک و گرادیان میدان در جهت شعاعی ($\nabla B \times B$)، جدایی بارها رخ خواهد داد که این عامل موجب تولید میدان الکتریکی عمودی ($E \times B$) و در نهایت حرکت شعاعی ستون پلازما می‌گردد.

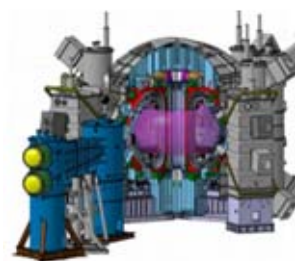


پروژه بین‌المللی توکامک ITER، یکی از پرهزینه‌ترین پروژه‌های علمی دنیا، واقع در فرانسه، با مشارکت کشورهای اتحادیه اروپا، آمریکا، ژاپن، کره جنوبی و... در حال انجام است. این توکامک بزرگترین و قدرتمندترین ماشین همجوشی در دنیا خواهد شد.



JET
England

توکامک جت واقع در انگلیس در زمان خود بزرگترین توکامک عملیاتی دنیا بود، اما از آذر ماه ۱۴۰۲ جای خود را به توکامک JT60-SA در ژاپن داد.



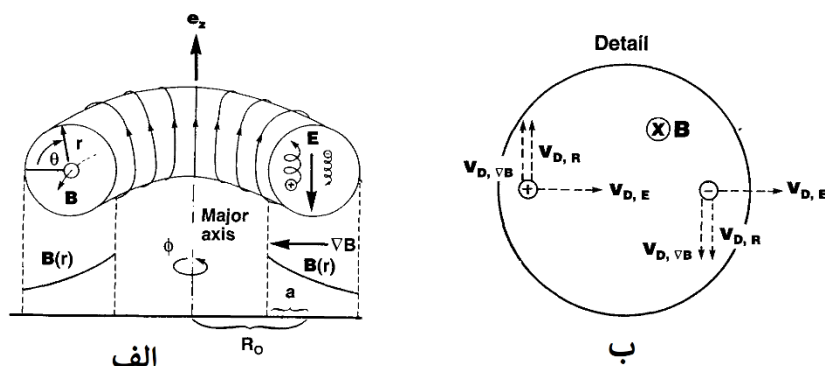
JT-60SA
Naka (JA)



نمایی از پیچه‌های مولد میدان قطبی (آبی) و یکی از پیچه‌های مولد میدان چنبره‌ای (بنفش) جدای از توکامک

اول آبان ماه ۱۴۰۲، توکامک JT-60SA در شهر ناکا در ژاپن به اولین پلاسمای خود دست یافت و به این ترتیب به بزرگترین توکامک ابرسانای عملیاتی در دنیا تبدیل شد. این خبر در دهم آذر ماه ۱۴۰۲ در یک گردهمایی رسمی با حضور نمایندگان ژاپن و اتحادیه اروپا اعلام گردید.

در شکل زیر جدایش و سوق ذرات به سمت دیواره نشان داده شده است.



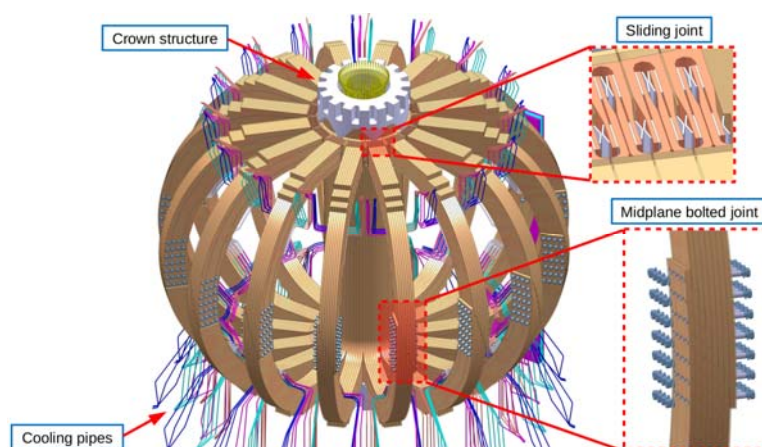
(الف) جدایی بارها ، (ب) سوق ذرات به سمت دیواره پس از اعمال میدان چنبره‌ای

قرار است از نتایج مهم بدست آمده در این پروژه در پروژه بین‌المللی ایترا نیز استفاده شود بنابراین نتایج حاصل از این توکامک از اهمیت مضاعف برخوردار است. همانطور که گفته شد، ایترا نام بزرگترین پروژه بین‌المللی در دست ساخت در زمینه راکتورهای گداخت در کشور فرانسه است که هدف از آن تولید انرژی بیشتر از انرژی دریافتی با استفاده از گداخت هسته‌ای می‌باشد. این پروژه بزرگ متکی بر دانش و فناوری‌ای است که در پروژه JT-60SA مورد آزمایش قرار گرفته است.

میدان مغناطیسی چنبره‌ای به تنهایی برای غلبه بر نیرویی که به دلیل ساختار چنبره‌ای محفظه، در راستای شعاعی به سمت دیواره‌ها به ذرات پلازما وارد می‌شود کافی نیست و اگر تنها میدان مغناطیسی اعمالی از نوع چنبره‌ای باشد، ذرات قبل از انجام واکنش گداخت به دیواره برخورد کرده و محصورسازی از بین می‌رود. بنابراین وجود میدان‌های مغناطیسی دیگری نیز برای محصورسازی پلازما و به تعادل رسیدن آن ضروری است.



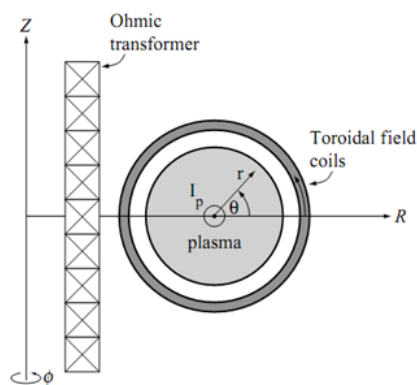
توکامک KSTAR که در کره جنوبی واقع شده است، یکی از اولین توکامک‌های دنیا است که پیچ‌های میدان مغناطیسی آن از جنس ابرسانا است. این توکامک نیز یکی از همکاران پروژه عظیم الجثه ایتر است.



پیچ‌های مولد میدان چنبره‌ای و اتصالات مربوطه همراه با خنک‌کننده‌ها

سیم‌پیچ مرکزی

برای غلبه بر جدایش و سوق ذرات به سمت دیواره از میدان مغناطیسی قطبی استفاده می‌شود. بدین ترتیب که سیم‌پیچ مرکزی یک جریان چنبره‌ای در پلازما القا می‌کند و این جریان، میدان قطبی را به پلازما اعمال می‌کند. در شکل زیر محل قرارگیری سیم‌پیچ مرکزی نشان داده شده است.



محل قرارگیری سیم‌پیچ مرکزی



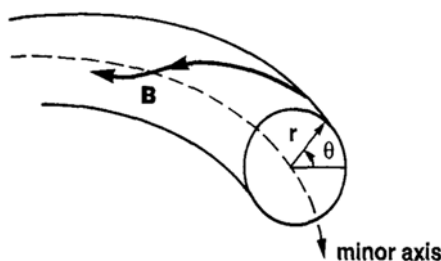
توکامک DIII-D واقع در آمریکا در کنار توکامک کروی NSTX از بزرگترین توکامک‌های آمریکا هستند. این توکامک با سطح مقطع D شکل به منظور بررسی تأثیر شکل سطح مقطع پلازما بر عملکرد توکامک ساخته شده بود.

سیم‌پیچ‌های کنترلی

پایدارسازی و تثبیت پلازما در جهت عمودی به وسیله سیم‌پیچ‌های کنترلی صورت می‌گیرد. این دسته از سیم‌پیچ‌ها نیز به صورت چنبره‌ای در اطراف چنبره و یا داخل آن قرار گرفته و در ارتباط با سیستم کنترلی هستند و با تولید میدان مغناطیسی در صورت لزوم شکل و مکان پلازما را کنترل می‌کنند.

این مولد مغناطیسی به دلیل نیاز به پاسخگویی سریع دارای تعداد دور کمتر و در نتیجه اندوکتانس کمتر نسبت به سایر سیم‌پیچ‌های قطبی می‌باشد.

برآیند دو میدان مغناطیسی چنبره‌ای و قطبی یک میدان مغناطیسی مارپیچی تولید می‌کند که باعث جلوگیری از جدایی بارها و حرکت ذرات به سمت دیواره می‌شود. این میدان مارپیچی در شکل زیر نشان داده شده است.



میدان مغناطیسی کل در یک توکامک

سیم‌پیچ‌های تعادلی

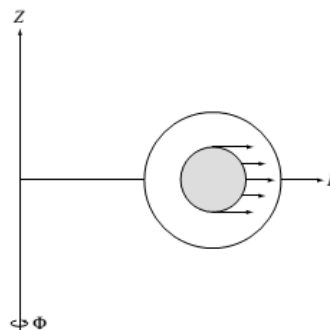
عامل دیگری که در توکامک وجود دارد و باعث انتشار ذرات به سمت دیواره می‌شود، ناشی از ساختار چنبره‌ای توکامک است. به دلیل این ساختار، فشار جنبشی که هم در راستای افزایش شعاع فرعی به سمت دیواره داخلی چنبره و هم در راستای افزایش شعاع فرعی به سمت دیواره بیرونی چنبره عمل می‌کند، در نهایت یک نیروی خالص دیگر به وجود می‌آورد که باعث افزایش شعاع اصلی چنبره‌ای می‌شود. این نوع از انتشار ذرات به سمت دیواره در شکل زیر نشان داده شده است.

سیم‌پیچ‌ها و صفحات غیر

فعال داخل محفظه

از آنجا که پلاسما در معرض ترکیبی از نیروهای چنبره‌ای برونسو قرار دارد، به طور طبیعی شروع به حرکت به سمت بیرون می‌کند. همچنان که پلاسما به دیواره نزدیک می‌شود جریان در ساختار غیرفعال تعبیه شده در محفظه القاء می‌گردد و چون جهت جریان القایی در جهت خلاف جریان پلاسما می‌باشد، لذا ستون پلاسما را دفع می‌کند و توازن نیروی چنبره‌ای حاصل می‌شود.

ولی در این روش به دلیل رسانای کامل نبودن، ساختار غیر فعال به کار رفته و انتشار شار قطبی از آن، محدودیت‌هایی وجود دارد. لازم به ذکر است که در سیستم غیرفعال، جریانی ناشی از سیستم تأمین انرژی در آن تخلیه نمی‌شود بلکه جریان آن همانطور که ذکر شد ناشی از القاء می‌باشد.



انتقال افقی پلاسما به سمت بیرون ناشی از ساختار چنبره‌ای

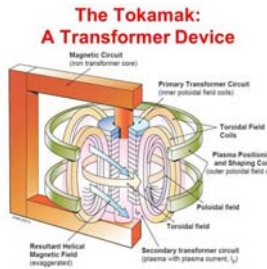
این نیروها به صورت زیر هستند:

$$F_{out} = 2p \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi \cdot (r_0 + a \sin \theta) a d\theta = 4\pi a p \left(r_0 \frac{\pi}{2} + a \right)$$

$$F_{in} = 2p \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi \cdot (r_0 - a \sin \theta) a d\theta = 4\pi a p \left(r_0 \frac{\pi}{2} - a \right)$$

$$F_{net} = F_{out} - F_{in} = 4\pi a p (2a) = 8\pi a^2 p$$

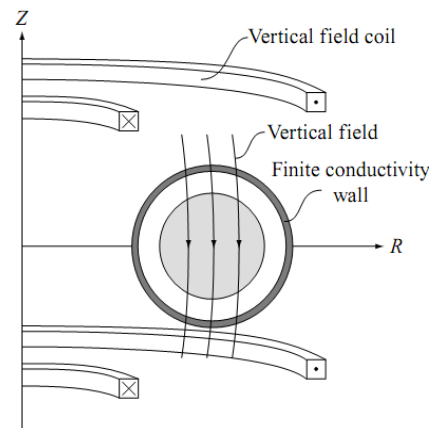
در روابط بالا a شعاع فرعی و r_0 شعاع اصلی چنبره است. برای خنثی سازی این نیروی برهم زننده محصورسازی می‌توان از سیم‌پیچ‌های تعادلی استفاده کرد.



طرحواره‌ای از نحوه عملکرد

سیم‌پیچ مرکزی به صورت

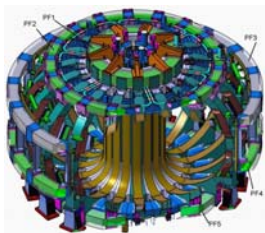
ترانسفورمر



سیم‌پیچ‌های تعادلی تولیدکننده میدان عمودی

این سیم‌پیچ‌ها یک میدان مغناطیسی عمودی در راستای Z بر پلازما وارد می‌کنند، در نتیجه فشار مغناطیسی در مرزهای خارجی پلازما افزایش می‌یابد و از افزایش شعاع پلازما و نیز از برهم خوردن تعادل جلوگیری به عمل می‌آید.

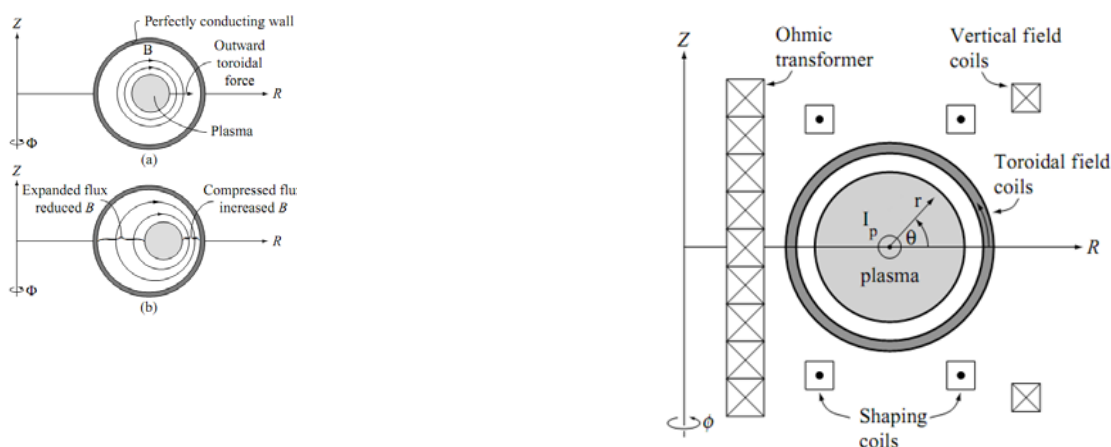
سیم‌پیچ‌های شکل‌دهنده



نمایی از انواع پیچ‌های چنبره‌ای

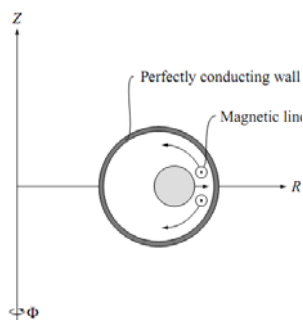
و قطبی در یک توکامک نوعی

در توکامک با استفاده از میدان مغناطیسی قطبی می‌توان پلاسمایی با سطح مقطع‌های گوناگون شامل سطح مقطع دایروی، کشیده و پلازما با ساختار جداساز تولید کرد که هر یک از این سطح مقطع‌ها مزایایی دارند. برای رسیدن به هریک از ساختارهای اشاره شده به یک نیروی شعاعی نیاز داریم که این نیروی شعاعی از طریق سیم‌پیچ‌های شکل‌دهنده یا منحرف‌کننده تولید می‌شود. این سیم‌پیچ‌ها در داخل یا خارج چنبره توکامک قرار می‌گیرند. در شکل زیر محل قرارگیری هریک از سیم‌پیچ‌های مرکزی، سیم‌پیچ میدان چنبره‌ای، سیم‌پیچ تعادلی و شکل‌دهنده به صورت شماتیک نشان داده شده است.

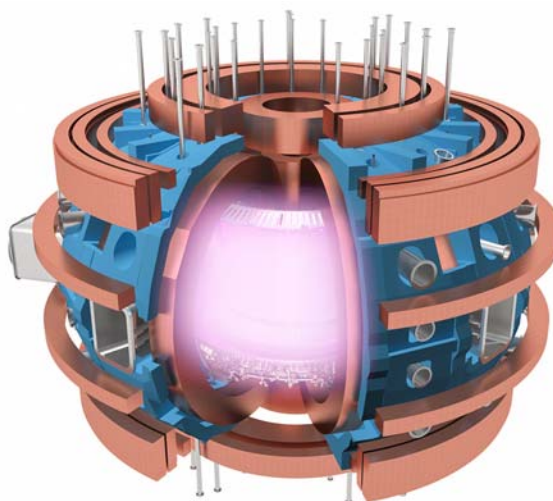


نحوه قرارگیری سیم‌پیچ مرکزی، سیم‌پیچ میدان چنبره‌ای، سیم‌پیچ تعادلی و شکل دهنده

در نهایت به این ترتیب و با اعمال ترکیبی از میدان‌های مغناطیسی قطبی و چنبره‌ای شرایطی فراهم می‌شود که در آن کلیه نیروهای وارد بر پلاسمای توکامک بعنوان محیط وقوع واکنش گداخت با یکدیگر برابر می‌شوند و پلاسمای به تعادل می‌رسد.



نحوه قرارگیری صفحات غیر فعال و چگونگی عملکرد آن

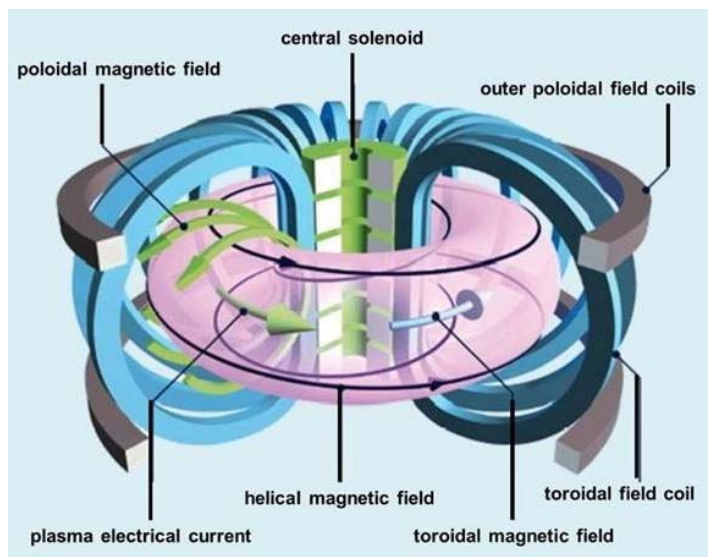


موقعیت سیم‌پیچ‌های تولیدکننده میدان مغناطیسی قطبی (فوهه‌ای) و چنبره‌ای (آبی)

شبیه‌سازی پلاسما

اولین فعالیت‌هایی که در زمینه مدل‌سازی پلاسما انجام شد در دهه ۵۰ میلادی صورت گرفت. این فعالیت‌ها تا مطالعه فرایندهای جنبشی در پلاسمای غیر برخوردی با روش ماکروزره، نوسانات پلاسما، ناپایداری باریکه، میرایی لاندائو خطی و غیرخطی نیز ادامه یافت. اما این تحقیقات به‌طور مستقیم به همجوشی کنترل شده و شبیه‌سازی رفتار پلاسما در دستگاه‌های واقعی مرتبط نبود. در دهه ۶۰، این مطالعات به صورت تئوری و تجربی قابل تأیید نبودند فقط مسائل مربوط به اتلاف ذرات در آینه‌های مغناطیسی (پخش ذرات در مخروط اتلاف بر اثر برخوردای کولنی) با این مطالعات قابل اثبات بودند.

همانطور که قبلاً بیان شد تحت تأثیر این ترکیب از میدان‌ها، در نهایت ذرات به حرکت حول خطوط مارپیچی مقید می‌شوند و از برخورد با دیواره‌ها جلوگیری می‌گردد. در شکل زیر، سیم‌پیچ‌ها و خطوط مارپیچی میدان ترکیبی حاصله به صورت کلی‌تر به نمایش درآمده است.



پیچ‌های تولیدکننده میدان‌های مغناطیسی و خطوط مارپیچی حاصله

به طور خلاصه می‌توان گفت سیم‌پیچ‌های تولیدکننده‌ی میدان مغناطیسی قطبی که میدانی به مراتب ضعیف‌تر از میدان مغناطیسی چنبره‌ای ولی کاملاً ضروری برای به تعادل رساندن پلاسما تولید می‌کنند، متشکل از سیم‌پیچ داخلی و سیم‌پیچ‌های خارجی هستند. سیم‌پیچ داخلی یا مرکزی که یکی از ابزارهای گرمایش اهمی پلاسما نیز محسوب می‌شود در مرکز چنبره قرار دارد و با ساز و کار ترانسفورمر در داخل پلاسما یک جریان چنبره‌ای و به تبع آن میدان مغناطیسی قطبی تولید می‌کند. در سیم‌پیچ‌های خارجی مانند سیم‌پیچ‌های تعادلی و سیم‌پیچ‌های شکل‌دهی، با عبور جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی قطبی در پلاسما تولید می‌شود که برآیند این میدان‌های مغناطیسی، برای به تعادل رساندن پلاسما و به دنبال آن وقوع واکنش گداخت لازم است.

تبادل مرز آزاد

طراحی سیم‌پیچ‌های میدان مغناطیسی قطبی با حل مسئله تبادل مرز آزاد صورت می‌گیرد. بدین معنی که با حل آن می‌توان بررسی کرد که ساختار سیم‌پیچ‌های تولید کننده میدان مغناطیسی قطبی مانند جریان عبوری از آنها، موقعیت قرارگیری، تعداد سیم‌پیچ‌ها، تعداد دورهای هر سیم‌پیچ و مواردی از این دست برای رسیدن به یک پلاسمای متبادل که شرایط اولیه وقوع واکنش گداخت را به همراه دارد چگونه باشد.

لفظ "آزاد" بدین معناست که پلاسمای برای انتخاب مکان خود درون محفظه توکامک، آزاد است. در حالیکه در مسئله تبادل مرز ثابت، تبادل پلاسمای را در شرایطی بررسی می‌کنیم که سطح مقطع پلاسمای از پیش تعیین شده است، به عبارت دیگر در شرایط مرز ثابت، تبادل پلاسمای به دلیل عبور جریان از سیم‌پیچ‌هایی حاصل می‌شود که مکان این سیم‌پیچ‌ها با توجه به شکل از پیش تعیین شده‌ی سطح مقطع پلاسمای تعیین می‌گردد. در مسئله مرز آزاد، موضوع برعکس است یعنی شکل سطح مقطع پلاسمای، معین نیست و فضای بیرون از پلاسمای، تعیین کننده‌ی آن است.

شبیه‌سازی تبادل مرز آزاد

در شبیه‌سازی تبادل مرز آزاد، باید به حل معادله تعادلی پردازیم که برای پلاسمای مغناطیده با ساختار چنبره‌ای و متقارن محوری، مانند پلاسمای توکامک، تعریف شده است. این معادله دیفرانسیلی مرتبه دوم به نام معادله گراد-شفرانف شناخته می‌شود. در حل این معادله، اثرات غیرخطی نیز دخیل هستند که حل آن را دشوار می‌کند. غیرخطی بودن این معادله چند دلیل دارد:

- ۱- غیرخطی بودن جمله مربوط به پروفایل چگالی جریان در معادله گراد-شفرانف
- ۲- نامعین بودن محدوده‌ی پلاسمای، چون مرز پلاسمای، آزاد است و با محدود کننده یا منحرف کننده تعیین می‌شود
- ۳- در توکامک‌هایی که دارای ترانسفورمر آهنی هستند، گذردهی مغناطیسی نیز غیرخطی است

تئوری و تجربه از دو زبان متفاوت استفاده می‌کنند و برای برقراری ارتباط نیاز به یک مترجم دارند، این وظیفه توسط کامپیوتر انجام می‌شود. مفاهیم نظری، پایه و اساس ساخت مدل ریاضی یک فرایند را ایجاد می‌کنند و پس از آن می‌توان آن فرایند را به‌طور کامل تحلیل کرد. یک مدل با مقایسه بین نتایج محاسباتی و نتایج تجربی، می‌تواند نشان دهد که در یک آزمایش تجربی دقیقاً چه اتفاقی می‌افتد.

"شبیه‌سازی در غیاب محیط"

عملی و آزمایشگاهی، به عنوان

یک آزمایشگاه مجازی ابزاری

نقش می‌کند"

شبیه‌سازی تعادل در

پلاسمای توکامک

این مبحث را می‌توان از دیدگاه برخورد با مسئله تعادل به دو نوع، شبیه‌سازی مستقیم تعادل در پلازما و بازسازی تعادل در پلازما تقسیم‌بندی کرد.

در روش مستقیم، پروفایل پلازما مثلاً چگالی جریان، ورودی محاسبات است و با حل معادله، سطوح شار به دست می‌آید. ولی در حالت غیرمستقیم روش کار به این صورت است که با توجه به اینکه چگالی جریان وابسته به یک سری از پارامترهای آزاد موجود در معادله است، پس پارامترهای آزاد را طوری انتخاب می‌کنیم که سطوح شار و میدان مغناطیسی حاصل شده بیشترین تطابق را با داده‌های تجربی داشته باشد.

این پیچیدگی‌ها و مواردی از این دست، استفاده از روش‌های عددی در حل معادله گراد-شفرانف را ناگزیر می‌کند. در این گزارش با روش نیوتن-رافسون به حل عددی معادله گراد-شفرانف در شرایط مرز آزاد برای توکامک مورد نظر پرداختیم.

طراحی اولیه سیم‌پیچ‌های میدان مغناطیسی قطبی

روش کار به این ترتیب است که در ابتدا کلیدی‌ترین مشخصات توکامک هدف شامل شعاع بزرگ و کوچک، جریان پلازما، میدان مغناطیسی چنبره‌ای، کشیدگی، مثلث‌گونگی و ضرایب ایمنی را مد نظر قرار می‌دهیم، سپس مشخصات سیم‌پیچ‌های تولیدکننده‌ی میدان مغناطیسی قطبی را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که با مشخصات کلیدی فوق‌الذکر در معادله تعادل گراد-شفرانف صدق کند و سطوح شار مغناطیسی تشکیل شوند، به عبارت دیگر تعادل در پلازما برقرار شود. به این ترتیب می‌توان تعداد سیم‌پیچ‌ها، جریان عبوری از هر سیم‌پیچ، تعداد دورهای هر سیم‌پیچ و مهم‌تر از همه موقعیت شعاعی و عمودی آنها را مشخص کرد.

بر همین اساس و با در نظر گرفتن توکامکی با مشخصات کلیدی توکامک هدف، ویژگی‌های دقیق سیم‌پیچ‌های مولد میدان مغناطیسی قطبی که متضمن تعادل پلازما هستند بدست آمد.

در جدول بعد مهم‌ترین ورودی‌های روش حل عددی معادله تعادل آورده شده‌اند.

مشخصات کلیدی ورودی در روش حل مورد استفاده

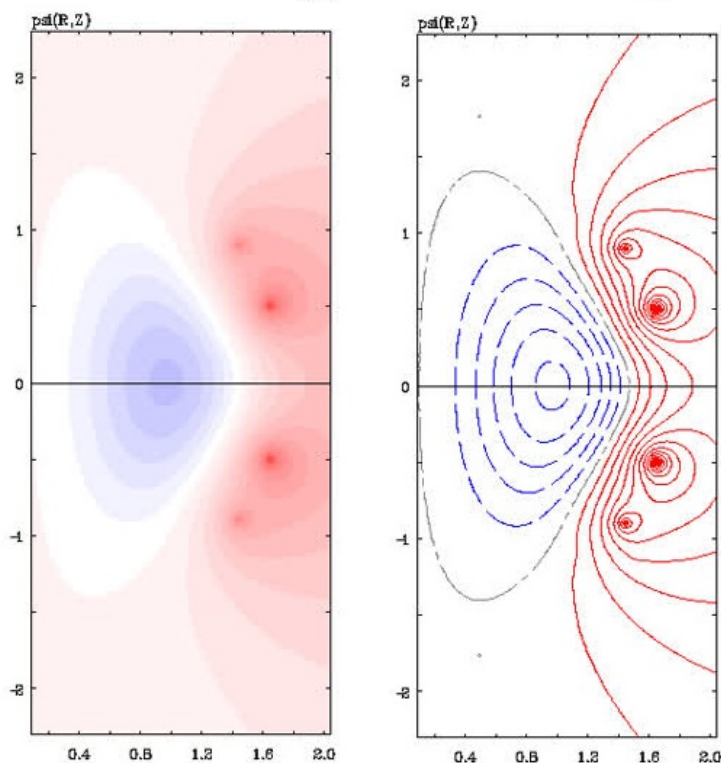
ردیف	پارامتر
۱	شعاع بزرگ
۲	شعاع کوچک
۳	جریان پلازما
۴	میدان مغناطیسی چنبره‌ای
۵	کشیدگی
۶	مثلث گونگی
۷	ضریب ایمنی محوری
۸	ضریب ایمنی در سطح پلازما

تبادل

پدیده‌های موجود در طبیعت در کلیه زمینه‌ها اغلب با استفاده از معادلات دیفرانسیلی و یا انتگرالی قابل توصیف بوده و مدل‌سازی می‌شوند. این معادلات فقط در پاره‌ای از موارد دارای حل تحلیلی می‌باشند و در اکثر موارد به دلیل پیچیدگی‌های موجود به صورت عددی به حل آن‌ها پرداخته می‌شود. استفاده از حل تحلیلی در این موارد به دلیل ساده‌سازی‌های بسیاری که در آن صورت می‌گیرد به هیچ عنوان دقیق نیست.

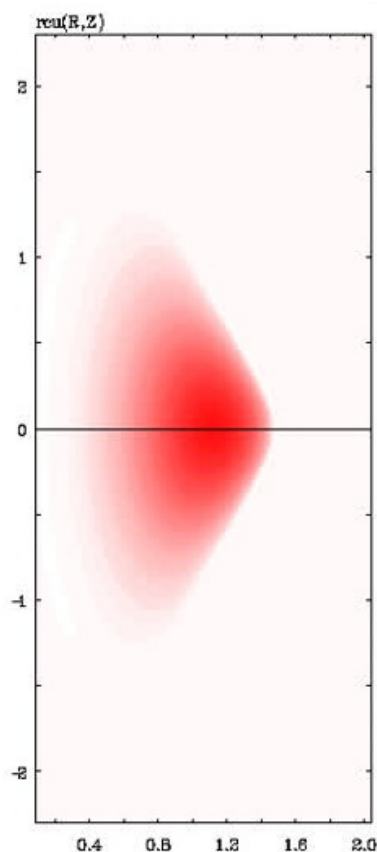
با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته و امکان انجام سریع محاسبات از طریق کامپیوترهای موجود، استفاده از روش‌های حل عددی برای شبیه‌سازی‌های پیچیده در طراحی سیستم‌های مهندسی به رویکردی مهم تبدیل شده است.

در ادامه چند نمونه از مهمترین نتایج حاصل از حل معادله تعادل در شرایط مرز آزاد شامل شار مغناطیسی قطبی و خطای همگرایی نمایش داده شده‌اند.



نمایش شار قطبی در توکامک هدف (MAST)

هدف اصلی از شبیه‌سازی عددی تبدیل یک مسئله پیچیده به یک فرم ریاضی گسسته و ساده، حل آن با استفاده از کامپیوتر و به دست آوردن نتایج تقریبی می‌باشد. انتخاب روش مناسب حل عددی، دستیابی به نتایج قابل قبول و دقیق را امکان‌پذیر می‌نماید. از جمله این روش‌های حل عددی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به روش‌های تفاضل محدود (FDM)، المان محدود (FEM)، المان مرزی (BEM) و روش بدون شبکه (MFM) اشاره کرد.



نمایش خطای همگرایی شار قطبی در توکامک هدف (MAST)

برخی از کدهای شبیه‌سازی تعادل مرز آزاد در پلاسمای توکامک

کد EQUAL:

یک کد تجاری محصول بلژیک است که در سال ۲۰۱۰ ارائه شد و از نوع کدهای مرز آزاد می‌باشد. برای بازسازی تعادل به کار می‌رود و براساس الگوریتم EFIT است. این کد، معادله گراد-شفرانف را با استفاده از داده‌های حاصل از ابزارهای

انواع مختصات مورد استفاده

در حل معادله تعادل

با توجه به ساختار توکامک که دستگاهی با تقارن چنبره‌ای است دو سیستم مختصات به طور معمول در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی دستگاه مختصات استوانه‌ای است که با فرض تقارن محوری و با استفاده از مختصات استوانه‌ای (R, ϕ, Z) که در آن R مختصات شعاعی، ϕ زاویه چنبره‌ای و Z ارتفاع می‌باشد معادلات حل می‌شود و دیگری دستگاه مختصات شار است که بر اساس ساختار سطوح شار شکل گرفته است.

یکی از مولفه‌های آن ψ می‌باشد و دو مولفه دیگر زاویه قطبی، θ ، و زاویه چنبره‌ای، ϕ ، می‌باشند.

تشخیصی حل می‌کند تا پروفایل جریان نامشخص را در پلازما تعیین کند. صحت‌سنجی آن با کد EFIT از داده‌های جت صورت گرفت و توافق خوبی با آن داشت.

کد FIXFREE:

یک کد تجاری محصول ایتالیا است که در سال ۲۰۱۰ ارائه شد. از نوع کدهای مرز آزاد است که براساس بسط جواب معادله گراد-شفرانف در سری‌های چنبره‌ای هارمونیک کار می‌کند.

کد CEDRES++:

یک کد تجاری محصول فرانسه در سال ۲۰۱۱ است. از نوع کدهای مرز آزاد شیء‌گرا به زبان C++ است که معادله تعادل پلازما را در تقارن محوری توکامک حل می‌کند، در حالت عملکرد مستقیم، معادله تعادل را برای جریان پیچ‌های میدان قطبی (PF) حل می‌کند و در حالت عملکرد غیرمستقیم به دنبال توزیع جریان در کویل‌های PF برای رسیدن به شکل دلخواه پلازما می‌گردد.

کد EFIT++:

یک کد تجاری محصول انگلستان در سال ۲۰۱۰ است. از نوع کدهای مرز آزاد به زبان فورترن ۹۰ و C++ است که برای بازسازی تعادل پلازما و تعیین مرز آن به کار می‌رود. این کد توزیع میدان مغناطیسی متقارن محوری را به گونه‌ای محاسبه می‌کند که بالانس نیروی شعاعی را در توکامک برقرار کند. همچنین بزرگی جریان چنبره‌ای القایی را در ساختارهای رسانا که به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شوند نیز محاسبه می‌کند.

کد EQUINOX:

یک کد تجاری محصول فرانسه در سال ۲۰۰۰ است. از نوع کدهای مرز آزاد زمان واقعی و غیرمستقیم است (تعادل پلازما را بازسازی می‌کند)، زبان آن C++ و هدف آن تعیین مرز پلازما، تعیین هندسه سطوح شار درون و بیرون پلازما، تعیین چگالی جریان، تعیین پروفایل فاکتور ایمنی و دیگر پارامترهای مهم از تعادل است.

چالش‌های پیش‌روی

پژوهشگران

بیشتر محققین حوزه‌ی گداخت بر این باورند که فهم ترابرد سخت‌ترین چالش بر سر راه یک راکتور همجوشی است. زیرا در پلازما، تقریباً همیشه ترابرد نه با برخوردهای کولنی، بلکه با آشفتگی پلازما ناشی از ناپایداری‌ها صورت می‌گیرد. فهم ترابرد غیرعادی نیازمند مدل‌های پیچیده‌ی جنبشی و شبیه‌سازی‌های عددی چندبعدی غیرخطی است.

پس از سال‌ها تحقیق گام‌های بلندی به سمت انسجام اولین نظریه‌ها برای قواعد ترابرد برداشته شده‌است. با این وجود هنوز راه طولانی تا شکل‌گیری روابط نظری که در طراحی دستگاه‌های جدید قابل اعتماد باشد، مانده‌است.

شبیه‌سازی ترابرد در توکامک هدف

محصورسازی

برای دستیابی به شرایط گرما هسته‌ای در ماشین توکامک، ضروری است پلازما برای مدت زمان کافی محصور شود.

زمان محصورسازی انرژی عبارت است از:

$$\tau_E = \frac{\int \frac{3}{2} n(T_i + T_e) d^3x}{P}$$

که در آن n ، چگالی پلازما، T_i و T_e به ترتیب دمای یون و الکترون است. در عبارت فوق صورت و مخرج کسر به ترتیب انرژی کل پلازما و توان کل ورودی به ماشین است. در ماشین توکامک، اتلاف پیوسته انرژی از پلازما وجود داشته و محصورسازی به دلیل فرآیندهای رسانش، همرفت و تابش با محدودیت همراه است. لذا می‌بایست با گرم کردن پلازما این اتلاف انرژی جبران گردد. در فرآیند محصورسازی مغناطیسی چنانچه ذرات باردار در پلازما به طور کامل توسط خطوط میدان مغناطیسی به دام می‌افتاد، پلاسمای همجوشی محصورشده مغناطیسی به آسانی قابل دستیابی بود. اما واقعیت خلاف آن است و پدیده ترابرد ذرات و انرژی در سطوح مغناطیسی نه تنها در توکامک‌ها بلکه در تمام دستگاه‌های چنبره‌ای مشاهده شده‌است.

ترابرد

در غیاب ناپایداری‌ها، محصورسازی پلاسمای توکامک متقارن محوری توسط برخوردهای کولنی تعیین می‌گردد و به آن ترابرد نئوکلاسیکی^۴ گفته می‌شود. متأسفانه، تحت چنین شرایطی محاسبات نظری ترابرد ذرات و انرژی با نتایج تجربی

⁴ neoclassical transport

ضرورت شبیه‌سازی ترابرد

مدلسازی ترابرد پلاسمای چنبره‌ای یکی از مهمترین مباحث برای پیش‌بینی تحولات زمانی پلاسمای مشتعل و توسعه‌ی طرح‌های کنترلی پلاسمای همجوشی است.

پیش‌بینی عملکرد پلاسمای توکامک با بکارگیری کدهای شبیه‌سازی به منظور محاسبه‌ی تحولات زمانی پروفایل‌های پلاسمای مانند دما و چگالی انجام می‌گیرد.

در این راستا کدهای مختلفی توسعه یافته‌اند که برخی از آنها عبارتند از:

- BALDUR
- TASK/TR
- JETTO
- ASTRA
- CRONOS

مغایرت داشته و نتایج داده‌های تجربی نسبت به پیش‌بینی تئوری نئوکلاسیک حدود دو مرتبه بیشتر است. از آنجا که فرآیندهای چنبره‌ای ترابرد بزرگی به طور کامل شناخته شده نیست، لذا محققان نام ترابرد غیرعادی^۵ را به آن اطلاق داده‌اند. عامل این ترابردهای غیرعادی وجود ناپایداری در پلاسمای است که باعث می‌شود ذرات و انرژی با آهنگ بیشتری از پلاسمای به سمت بیرون توکامک فرار کنند. برای نظم بخشیدن به درک مسئله ترابرد، تقسیم‌بندی زیر مورد توجه می‌باشد:

ترابرد کلاسیک به بررسی ترابرد برخوردی ذرات و انرژی بر حسب فرآیند پخش ساده در پلاسمای استوانه‌ای می‌پردازد.

ترابرد نئوکلاسیک به بررسی ترابرد برخوردی در چنبره پرداخته و در واقع، ترابرد کلاسیک همراه با در نظر گرفتن آثار هندسه‌ی چنبره‌ای است. این نوع ترابرد توسط برخوردهای کولنی صورت می‌گیرد و ترابرد غیرعادی ناشی از ناپایداری‌های میکروسکوپی پلاسمای را شامل نمی‌شود.

مطابق شکل زیر رژیم‌های مختلف ترابرد نئوکلاسیک شامل رژیم فیش-شروترو^۶، رژیم تخت^۷ و رژیم موزی^۸ است. ترابرد برخوردی در دماهای پایین به رژیم فیش-شروترو اختصاص داشته و مدل سیالی توصیف‌کننده‌ی رفتار پلاسمای است. این ناحیه توسط رژیم تخت که در آن وابستگی به فرکانس برخورد وجود ندارد، به رژیم موزی متصل می‌گردد. رژیم موزی اصطلاحاً رژیم کم برخورد نام دارد. به بیان دیگر، در دماهای بالا پخش برخوردها ضعیف‌تر بوده و یک پلاسمای نسبتاً غیربرخوردی ایجاد می‌گردد و در نتیجه بکارگیری مدل سیالی برای این رژیم کارآمد نخواهد بود.

^۵ Anomalous transport

^۶ Pfirsch-Schluter regime

^۷ Plateau regime

^۸ Banana regime

مدهای محصورسازی در

ماشین توکامک

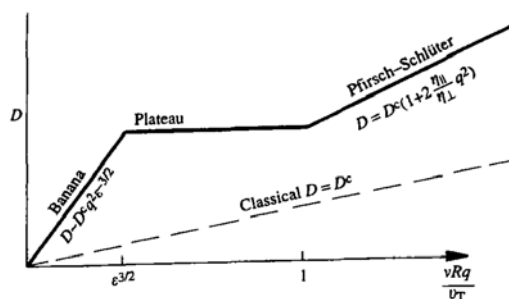
نتایج تجربی توکامک‌های مختلف بیانگر آن است که رژیم‌های عملیاتی متفاوتی که از آن‌ها به عنوان حالت‌های محصورسازی یاد می‌شود، در ماشین توکامک وجود دارد. این حالت‌ها در چهار بخش تقسیم‌بندی می‌شوند.

بخش اول پلاسماهایی با گرمایش اهمی را شامل می‌شود و سه بخش دیگر متعلق به پلاسماهایی با گرمایش اضافی است. دو حالت پایه محصورسازی پلاσμα با گرمایش اضافی عبارت‌اند از:

High confinement mode (H-mode)

Low confinement mode (L-mode)

بخش نهایی مربوط به حالت‌های محصورسازی ارتقاء یافته می‌باشد.



تغییرات ضریب پخش بر حسب فرکانس برخورد

شبیه‌سازی ترابرد

برای دستیابی به پلاسمای دما بالا، درک فرآیند ترابرد حرارتی و ذرات ضروری بوده و می‌بایست شبیه‌سازی ترابرد که توصیف‌کننده‌ی رفتار پلاσμα در هندسه واقعی است انجام گیرد. بدون کمک کدهای شبیه‌سازی عملاً بررسی و پیش‌بینی رفتار پلاσμα ممکن نخواهد بود. بدین منظور در این بخش به ازای پارامترهای توکامک MAST، شبیه‌سازی ترابرد یک بعدی با استفاده از روابط ترابرد پخش در پلاسمای توکامک بررسی شده‌است.

لازم بذکر است که اکثر تحلیل‌های موجود روی تحولات هسته‌ی پلاσμα در مقیاس زمانی ترابرد، از روابط ترابرد پخش بر مبنای روابط گرادیان شار استفاده می‌کنند. با بکارگیری روابط ترابرد پخش، محاسبه‌ی تحولات زمانی چگالی و دما به ازای گونه‌های مختلف ذرات در هسته پلاσμα انجام می‌گیرد. به علاوه، مهم‌ترین خروجی‌های شبیه‌سازی ترابرد عبارتند از: فاکتور ایمنی، فشار و ضرایب پخش حرارتی الکترون و یون.

رابطه گرادیان شار

برای فهم رفتار ماکروسکوپی پلاσμα، طبیعی است با استفاده از روابط سیالی به توصیف پلاσμα پرداخته شود. رابطه سیالی بر مبنای رابطه حرکت بوده و قادر به توصیف دقیق تحولات زمانی پلاσμα است. این در حالی است که این رابطه دارای یک بخش اینرسی است که ذاتاً غیرخطی می‌باشد. ویژگی مذکور سبب پیچیدگی و مشکل در حل عددی معادلات می‌گردد.

تعریف پارامتر

particle density	n_s
Particle temperature	T_s
particle flux	Γ_s
heat flux	Q_s
particle diffusivity	D_s
thermal diffusivity	χ_s
particle pinch velocity	V_s
heat pinch velocity	V_{Ks}
$V_{Ks} + (3/2)V_s$	V_{Es}
particle source and sink	S_s
heat source and sink	S_{Es}
normalized minor radius	ρ
$dV/d\rho$	V'

با فرض آنکه ترابرد در توکامک‌ها عمدتاً توسط پدیده‌هایی در مقیاس زمانی پخش کنترل می‌شوند، می‌توان معادلات سیال را به صورت معادلات پخش در نظر گرفت و سپس از پدیده‌هایی که مقیاس زمانی آن‌ها کمتر از پخش است صرف نظر کرد. در مقیاس زمانی فرآیند پخش، ترابرد پلاسمای توسط قانون اول پخش فیک (Fick) داده می‌شود:

$$\Gamma = -D\nabla n$$

که در آن Γ شار، D ضریب پخش و n متغیر وابسته اختیاری مربوط به پدیده‌های ترابرد در توکامک‌ها است. لازم به ذکر است قانون فیک، در مواقعی که سیستم در حالت پایا و یا حالت تعادلی قرار دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه‌ی پخش مستقیماً از رابطه‌ی پیوستگی استخراج می‌گردد:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = 0$$

چنانچه در سیستم، چاه یا چشمه وجود داشته باشد، در سمت راست معادله‌ی فوق جای می‌گیرد. با جایگذاری رابطه‌ی یک در رابطه‌ی دو رابطه پخش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot (D\nabla n)$$

روابط ترابرد پخش

با بکارگیری مفهوم پلاسمای متقارن محوری و میانگین سطوح شار، پدیده‌های پخش سه بعدی پلاسمای به روابط یک بعدی کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی انجام گرفته، روابط پخش یک بعدی برای چگالی و دما نسبت به شعاع کوچک به هنجار شده $(\rho = \frac{r}{a})$ ، مطابق زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_s V') = -\frac{\partial}{\partial \rho}(V' \Gamma_s) + S_s V'$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{3}{2}n_s T_s V'^{5/3}\right) = -V'^{2/3} \frac{\partial}{\partial \rho}(V' Q_s) + S_{Es} V'^{5/3}$$

محصولسازی H-mode در توکامک ASDEX

که در آن

حالت محصولسازی H-mode اولین بار در توکامک آمریکایی ASDEX مشاهده شد. در آزمایش‌های انجام شده بر روی این توکامک مشاهده شد که با اعمال توان گرمایشی خاص بر پلازما، زمان محصولسازی به حدود دو برابر (در مقایسه با حالت L-mode) افزایش می‌یابد. به این ترتیب با افزایش توان گرمایش اعمالی به پلازما کیفیت محصولسازی متفاوت بوده، به طوری که می‌توان دو رژیم عملکردی L-mode و H-mode را در نظر گرفت.

در رژیم دوم، تشکیل سدهای ترابردی در لبه‌ی پلازما مانع ترابرد ذره و انرژی به سمت خارج می‌گردد، لذا کیفیت محصولسازی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. سدهای ترابرد لبه در ناحیه شعاعی باریکی که پدستال نام دارد تشکیل می‌گردد.

رایج‌ترین روش گرمایش کمکی پلازما بکارگیری سامانه تزریق باریکه خنثی (NBI) و امواج (RF) می‌باشد.

$$\Gamma_s = \langle |\nabla \rho| \rangle n_s V_s - \langle |\nabla \rho|^2 \rangle D_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho}$$

$$Q_s = \frac{5}{2} \langle |\nabla \rho| \rangle n_s T_s V_{Es} - \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \chi_s \frac{\partial (n_s T_s)}{\partial \rho} - \langle |\nabla \rho|^2 \rangle \left(\frac{5}{2} D_s - \chi_s \right) T_s \frac{\partial n_s}{\partial \rho}$$

در عبارت فوق ضرایب پخش حرارتی به صورت مجموع بخش آشفته χ^{TB} و بخش نئوکلاسیک χ^{NC} در نظر گرفته می‌شود ($\chi_s = \chi_s^{TB} + \chi_s^{NC}$). از آنجا که تئوری ترابرد آشفته برای توصیف پلازما کاملاً موفقیت آمیز نبوده است، لذا مدل‌های ترابرد آشفته بسیاری که بر مبنای نظریات بنا شده‌اند، معرفی و مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شبیه‌سازی ترابرد توکامک هدف (MAST)

در شبیه‌سازی حاضر، سناریو محصولسازی H-mode در نظر گرفته شده است. در این حالت پلاسمایی با ویژگی‌های مذکور در جدول زیر مد نظر می‌باشد.

R = 0.85m	$\delta = 0.3$	$T_e(0) = 1\text{keV}$
a = 0.65m	$B_t = 0.6\text{T}$	$T_i(0) = 1\text{keV}$
$\kappa = 2$	$I_p = 1\text{MA}$	$n_{e,i}(0) = 0.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$

در این پژوهش، پروفایل چگالی و دما بر حسب شعاع بهنجار شده به صورت زیر در نظر گرفته شده است که در آن n_0 و n_s به ترتیب چگالی در محور مغناطیسی و لبه‌ی پلازما می‌باشد (تعریف مشابه برای پارامترهای دمایی وجود دارد). چگالی در محور مغناطیسی برای الکترون و یون $0.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}$ است. همچنین دمای الکترون و یون در محور مغناطیسی برابر با 1keV در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی حاضر گرمایش پلازما به کمک تزریق ذرات خنثی با توان 2.2MW، انرژی 75keV و نمایه‌ی بیم گوسی مد نظر قرار گرفته است.

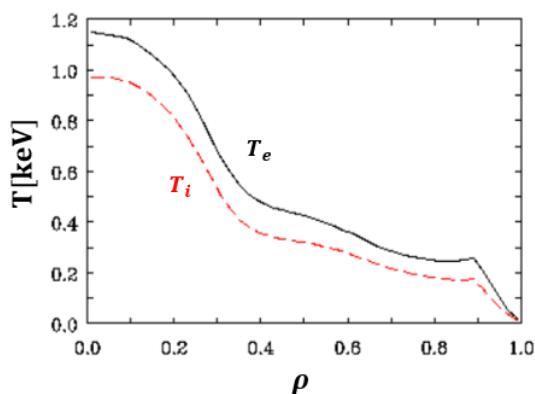
$$n(\rho) = (n_0 - n_s)(1 - \rho^2)^{1/2} + n_s$$

$$T(\rho) = (T_0 - T_s)(1 - \rho^2) + T_s$$

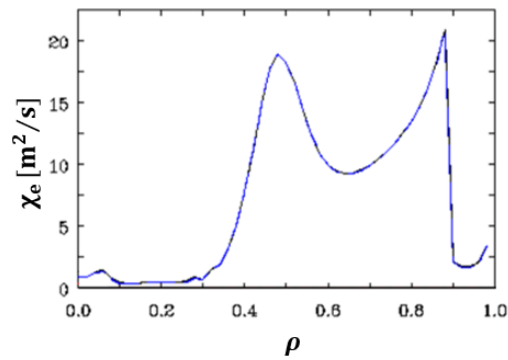


مقدار پیش فرض	توصیف عملکردی	کمیت
0.5	INITIAL DENSITY ON AXIS (10^{20}m^{-3})	n_0
0.05	INITIAL DENSITY ON SURFACE (10^{20}m^{-3})	n_s
1	INITIAL TEMPERATURE ON AXIS (keV)	T_0
0.01	INITIAL TEMPERATURE ON SURFACE (keV)	T_s

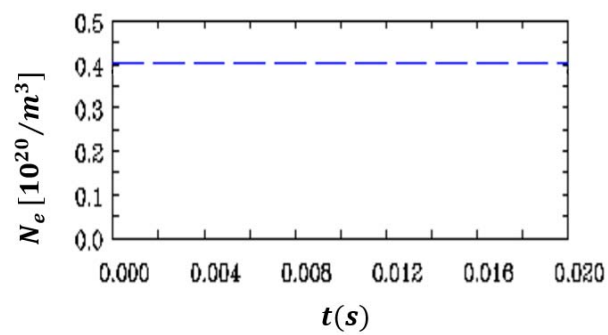
نمونه‌ای از خروجی‌های شبیه‌سازی شده، شامل تغییرات شعاعی دمای الکترون و یون در زمان 20ms و ضریب پخش حرارتی الکترون، تغییرات زمانی چگالی الکترون، تغییرات زمانی میانگین حجمی دمای الکترون و یون به همراه تغییرات زمانی توان ورودی به ماشین در تصاویر زیر آمده‌است. لازم به ذکر است، صحت‌سنجی این بخش با داده‌های تئوری و تجربی در حال انجام است.



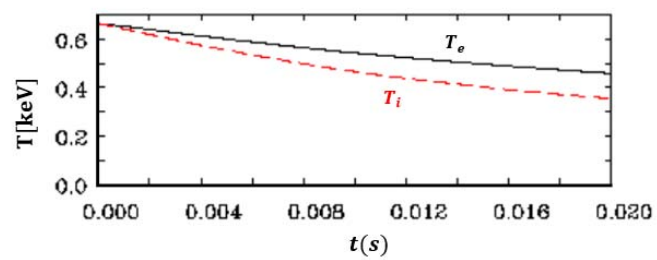
دمای الکترون و یون بر حسب تغییرات شعاع به‌نچار شده



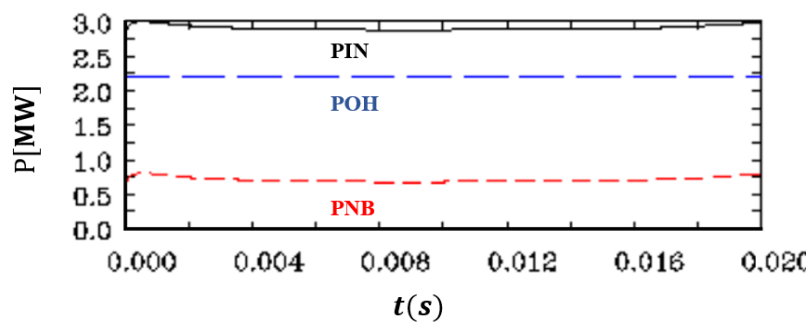
ضرب پخش حرارتی الکترون



تغییرات زمانی چگالی الکترون



تغییرات زمانی میانگین حجمی دمای الکترون و یون



تغییرات زمانی توان کل ورودی ماشین (PIN)، توان بیم ذرات خنثی (POH) و توان اهمی (PNB)