فصلنامه رویکردهای نوین در تحقیقات علوم پایه، فنی و مهندسی
سال ششم، شماره ۲۳، زمستان ۱۴۰۲
ISSN: ۲۶۴۵-۵۴۳۹
www.jonarbset.ir

بررسی و تشریح توکامک های کروی

محمد صدیق [۱]

[۱] کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

چکیده

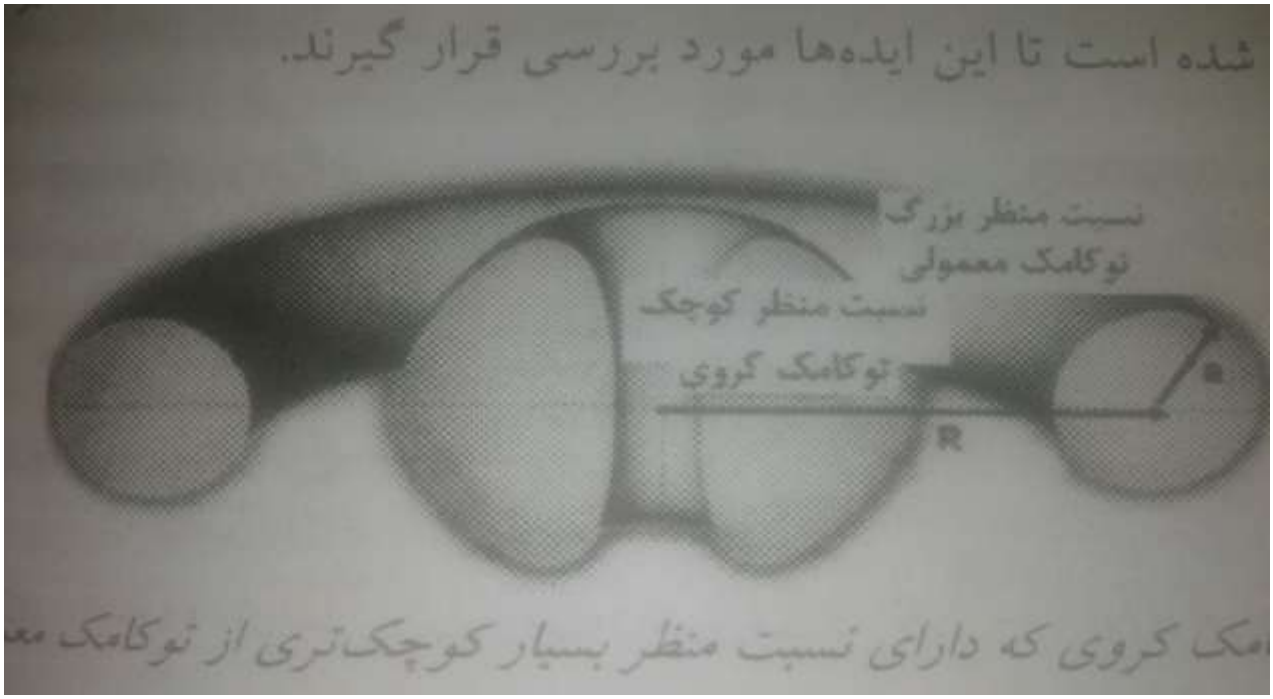
توکامک های کروی مزیت های زیادی در زمینه پایداری پلاسما دارند. در توکامک های کروی به میدان های مغناطیسی بسیار کوچکتری نسبت به توکامک های معمولی نیاز داریم که این امر به علت محصورسازی بسیار خوب این نوع از توکامک هاست. پارامتر بتا که عبارت است از نسبت فشار پلاسما به فشار مغناطیسی، در توکامک های کروی مقادیر بسیار بالایی است. به علت کوچک بودن میدان مغناطیسی در یک توکامک کروی، جریان های پیچه کاهش می یابند. توکامک های کروی دستگاه هایی فربه و کوچک با نسبت منظر بین ۱-۲ هستند. توکامک های کروی دارای جذابیت زیادی هستند و ایده های فراوانی در مورد حفره آنها وجود دارد. در توکامک های کروی، کشیده شدن پلاسما در جهت عمودی نسبت به شعاع فرعی آن رخ داده و نتایج مطلوبی در بر داشته است. از جمله توکامک های کروی می توان به START و جانشین آنها(MAST)اشاره کرد. در توکامک های کروی نسبت منظر از مقدار ۵/۲ به ۵/۱ کاهش می یابد و کشیدگی پلاسماازمقدار ۱/۱ به مقدار ۲افزایش می یابد و در نهایت میدان مغناطیسی کاهش می یابد.

واژه‌های کلیدی: توکامک های کروی، نسبت منظر، پلاسما، میدان مغناطیسی، پیچه ها، باریکه خنثی، ستون مرکزی، کشیدگی، بتا ,Tبتا N, START,MAST

۱.مقدمه

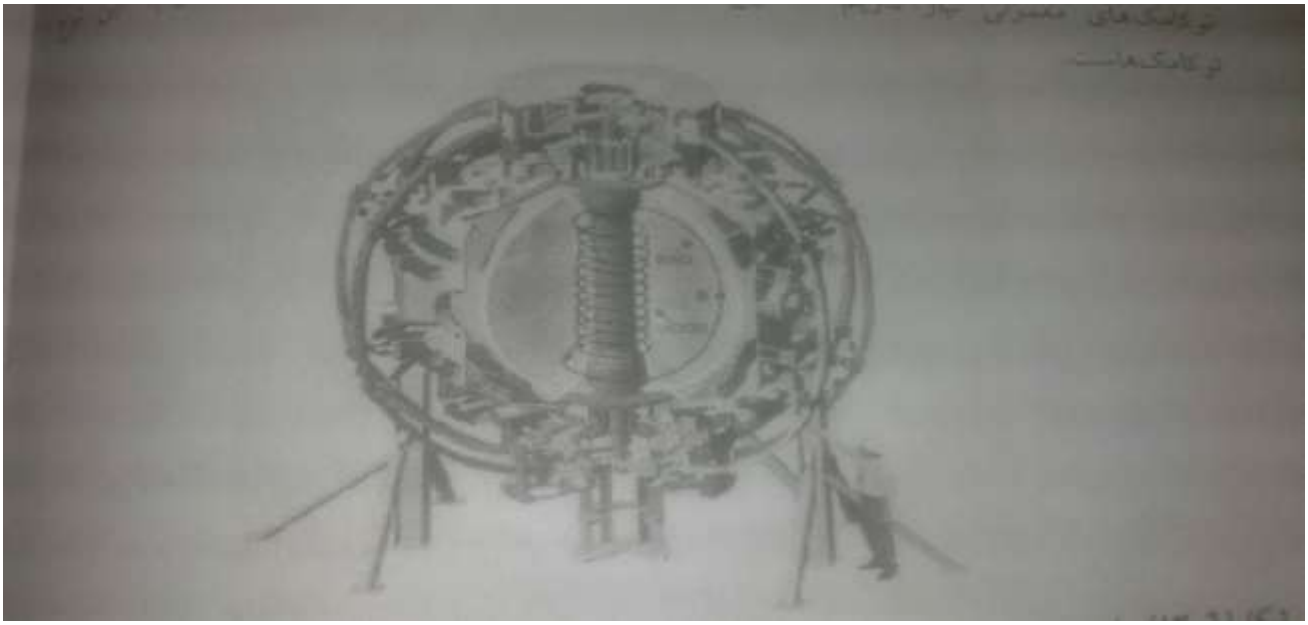
توکامک های کروی دستگاه هایی فربه و کوچک بوده که دارای نسبت منظر بین ۱-۲ می باشند. توکامک های کروی به شرطی میتوانند کروی باشند که طبق شکل(۱)حفره ای دروسط آنها وجود داشته باشد. توکامک های کروی با نسبت منظر کوچک دارای مزیت های زیادی هستند،امامشکلی که وجود دارد این است که چگونه میتوان همه ابزار و اجزای مورد نیاز را در یک حفره کوچک قرار داد. توکامک های کروی(ST)از جذابیت زیادی برخوردارند و به همین دلیل ایده های فراوانی در مورد حفره آنها ارائه گردیده است. در تجربه نیز چندین توکامک کروی در دنیا ساخته شده است تااین ایده ها مورد بررسی قرار گیرند.

شکل(۱):یک توکامک کروی که دارای نسبت منظر بسیار کوچکتری از توکامک معمولی می باشد[۱].



جدا از اندازه کوچک ومقرون به صرفه بودن،توکامک های کروی مزیت های زیادی درزمینه پایداری پلاسما دارند. درشکل(۲)ساختار میدان مغناطیسی یک توکامک کروی نشان داده شده است.رفتار خطوط میدان در این راکتورها نسبت به راکتورهای معمولی بسیار متفاوت است.یک ذره باردار در امتداد خط میدان پیش از برگشتن به خارج از پلاسما به طور مارپیچی در اطراف ستون مرکزی حرکت میکند. در توکامک های کروی به میدان های مغناطیسی بسیار کوچکتری نسبت به توکامک های معمولی نیاز داریم که این امر به علت محصورسازی بسیار خوب این نوع از توکامک هاست.

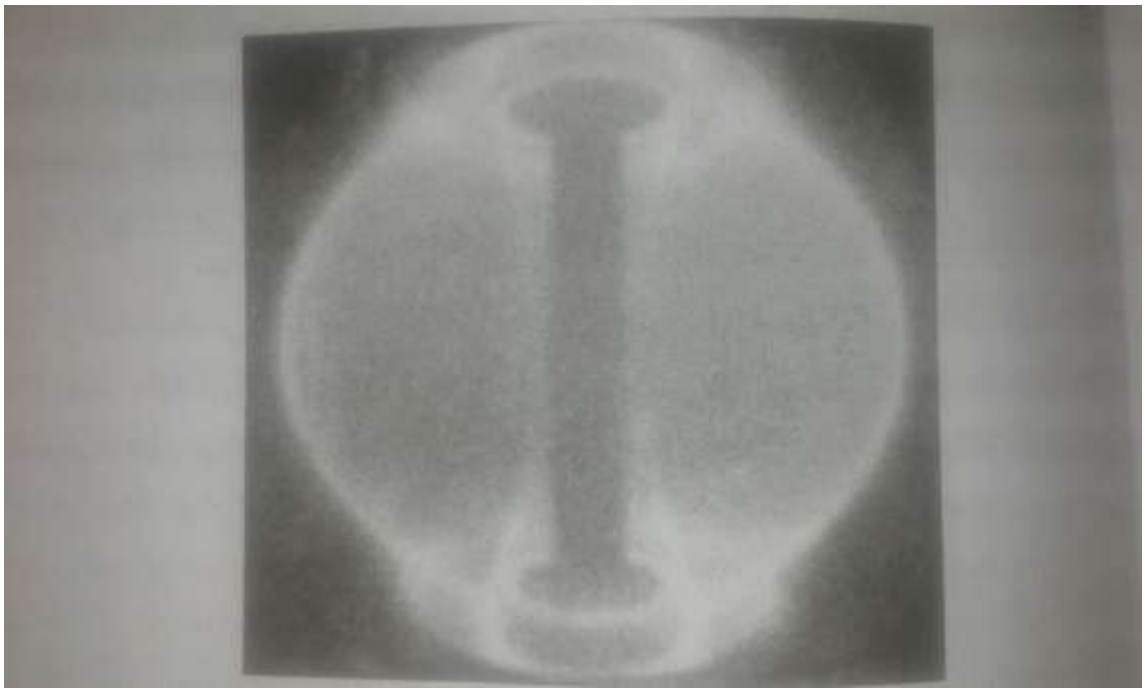
شکل(۲):طرح ساده یک خط میدان مغناطیسی در توکامک کروی همراه با ستون مرکزی حامل جریان.نواحی خمیدگی خوب ونامطلوب مشخص گردیده اند[۲].



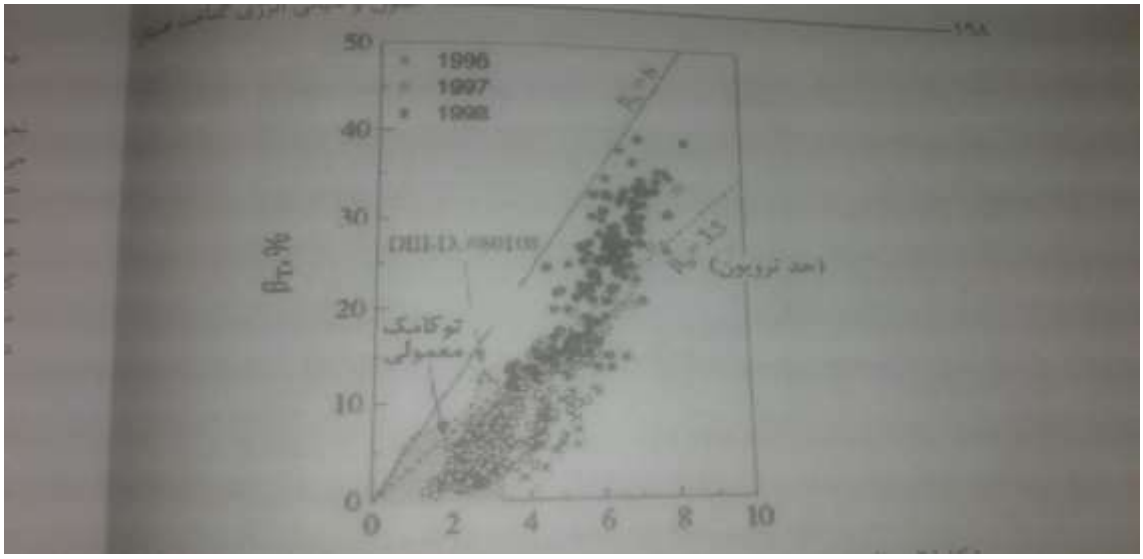
۲.کشیدگی پلاسما و تشریح چند نمونه از توکامک های کروی :

در سال ۱۹۸۶ میلادی نشان داده شد که میدان عمودی مورد نیاز برای توکامک ها،گرایش به کشیدن پلاسما داشته و همین مطلب در طراحی پایه ای توکامک های کروی مورد استفاده قرار گرفت[۳].کشیده شدن پلاسما در جهت عمودی نسبت به شعاع فرعی آن رخ داده و نتایج مطلوبی برای توکامک های کروی در بر دارد. همان طور که نسبت منظر از مقدار ۵/۲ به ۲/۱ کاسته میشود،کشیدگی پلاسما از مقدار ۱/۱ به مقدار ۲ افزایش یافته و میدان مغناطیسی که فاکتور کیفیت موردنیاز q را برای یک جریان پلاسمایی مفروض تامین میکند،با فاکتوری به اندازه بیست برابر کاهش می یابد[۲].بنابراین پارامتر بنا که عبارت است از نسبت فشار پلاسما به فشار مغناطیسی است،در توکامک های کروی دارای مقادیر بسیار بالایی است.ماشین های انگلیسی START و جانشین آنها(MAST)بیشترین اطلاعات رادرباره توکامک های کروی در اختیارمان قرار داده اند. تصویری از پلاسمای کروی ایجاد شده در START درشکل(۳)نشان داده شده است.نمودار مقادیر بتا که از START بدست آمده اندشکل(۴)بیانگر بهینه سازی بزرگی نسبت به توکامک های معمولی هستند.در این نمودار پارامتر بتاT بیانگر بتای چنبره ای(یعنی بتای محاسبه شده بامیدان مغناطیسی چنبره ای)و بتاN عبارت از بتای معمولی می باشد.داده های جدیدتر که با خطوط نقطه چین قرمز نمایش داده شده اند،ثابت میکنند که حدچگالی در یک ساختار کروی افزایش می یابد.

شکل(۳):پلاسمای دستگاه توکامک کروی START [1]

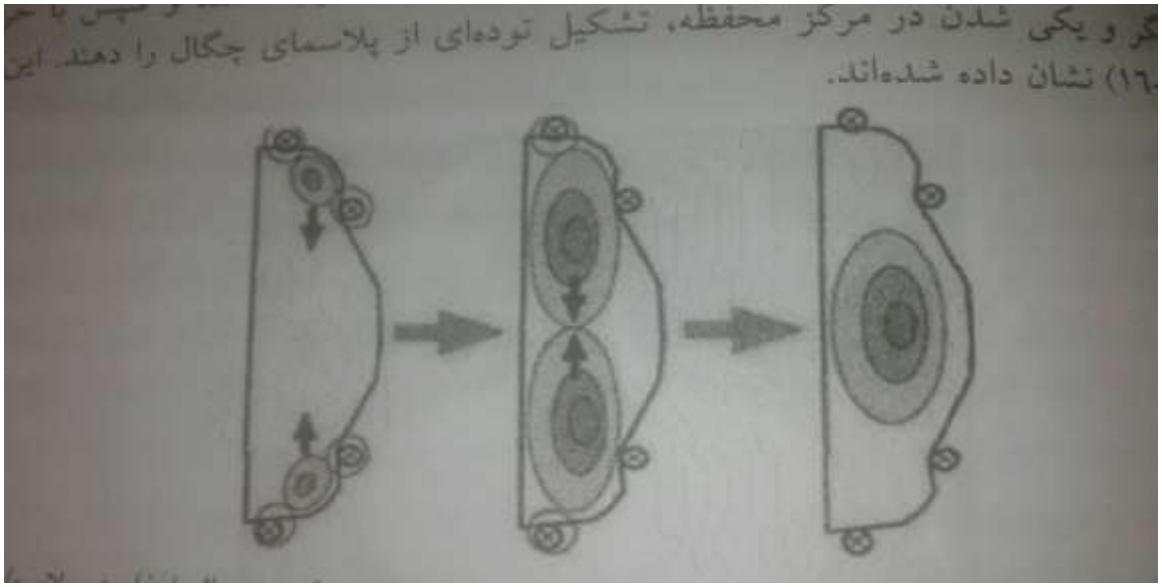


شکل(۴):نمودار بتای چنبر ای(بتاT) دردستگاه START وتوکامک های معمولی[۱]

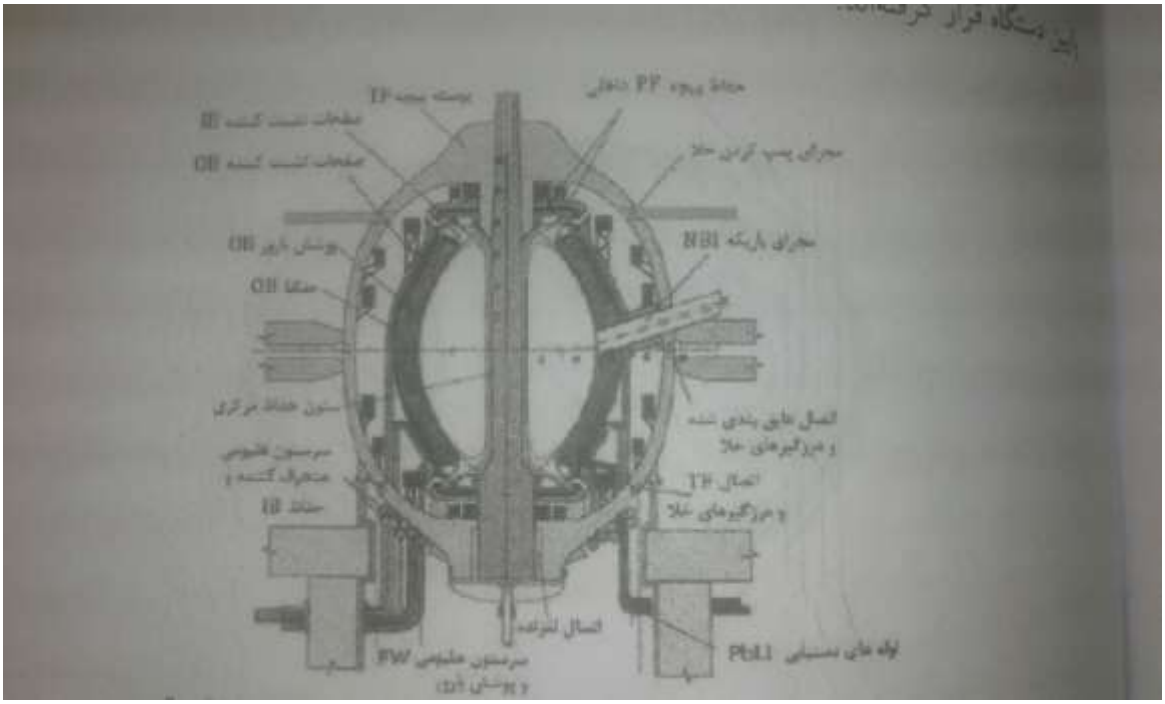


توکامک های کروی با وجود ظاهر فیزیکی شان،پدیده های مشابهی نظیر آنچه در یک توکامک با نسبت منظر بزرگ وجود دارد،نشان می دهند که می توان به مد H و ELM ها اشاره نمود. دستگاه MAST برای مطالعه برروی ELM ها بسیار مناسب بوده و در واقع،برای طراحی پیچه های متوقف سازی ELM ها مورد استفاده قرار گرفت.حالا این موضوع را بررسی می کنیم که چگونه می توان پهنای ستون مرکزی را در این ساختارها کمینه کرد. میدان مغناطیسی چنبره ای در یک توکامک توسط پیچه

هایی که از میدان حفره ای توکامک عبور میکنند،ایجاد میشود. طبق شکل (۳)در یک توکامک کروی تمامی پایه های مربوط به پیچه که از میان حفره میگذرند،باهم ترکیب شده و به صورت یک میله مسی منفرد،کل جریان الکتریکی را عبور میدهند. این امر امکان پذیر است زیرا میدان مغناطیسی در یک توکامک کروی دارای مقداری کوچک بوده که همین امر منجر به کاهش جریانهای پیچه میشود. یک روش برای القای جریان پلاسمای چنبره ای،قراردادن هسته های آهنی در میان حفره والقای جریان توسط ترانسفورماتور می باشد. این ترانسفورماتورها شامل پیچه های چنبره ای در اطراف پلاسما هستند که دارای حفره هایی در داخل بوده و به تحریک جریان القایی معروفند.عیب این روش آن است که جهت تحریک جریان، باید یک جریان افزایشی داشته باشیم. و از آنجایی که این جریان نمی تواند تا ابد افزایشی باشد،توکامک ناگزیر است تا به صورت پالسی کارکند. برای رفع این چالش،توکامک های پیشرفته از تحریک غیر القایی استفاده میکنند که متشکل از جریان خودراه انداز و جریان های تحریک شده توسط موج هستند.مشکلی که وجود دارد این است که نمی‌توان یک موج را بدون وجود پلاسما ایجاد کرد و همچنین نمی‌توان یک پلاسما را بدون وجود یک تبدیل چرخشی محصور کرد. بنابراین به نظر میرسد که می بایست دست کم برخی از پیچه های چنبره ای را در داخل حفره قرار داد. برای رفع این مشکل راه حلی نیز وجود دارد. تزریق باریکه خنثی روش سودمندی برای گرمایش توکامک های بزرگ به حساب می‌آید. در همین رابطه موفقیت های زیادی در بکارگیری تزریق باریکه خنثی درMAST به عنوان راه حلی جهت تحریک جریان حاصل شده است. همچنین این امکان وجود دارد که پلاسما در گوشه های محفظه خلا (جایی که پیچه های قطبی قرار گرفته اند)ایجاد شده و سپس با حرکت به سمت همدیگر و یکی شدن درمحفظه، تشکیل توده ای از پلاسما را دهند. این مراحل درشکل(۵)نشان داده شده اند.



شکل(۵):ایجاد یک پلاسمای چنبره ای در توکامک کروی بدون ستون مرکزی در اثر ادغام دوپلاسما[۱]



شکل(۶):طراحی راکتور توکامک کروی [4] ARIES -ST

دستگاه ARIES-ST در سال ۱۹۹۹ میلادی طراحی شده است که در شکل(۶)نمایی از آن را نشان داده ایم. ستون مرکزی آن به گونه ای طراحی شده که به سادگی بتوان آن را خارج وتعویض نمود. تمامی اجزا پوشش بارور آن در بیرون قرار دارند. همچنین منحرف کننده های طبیعی در بالا و پایین دستگاه قرار گرفته اند.

نتیجه گیری:

توکامک های کروی دارای اندازه کوچک و مقرون به صرفه هستند و مزیت های زیادی در زمینه پایداری پلاسما دارند. رفتار خطوط میدان مغناطیسی در این راکتورها نسبت به راکتورهای معمولی بسیار متفاوت است. در توکامک های کروی میدان های مغناطیسی بسیار کوچکتری نسبت به توکامک های معمولی مورد نیاز است وهمین امر به علت محصورسازی بسیار خوب این نوع از توکامک هاست. در توکامک های کروی با کاهش نسبت منظر از مقدار ۵/۲ به ۲/۱ وافزایش کشیدگی پلاسما از مقدار ۲/۱ به مقدار ۲ افزایش یافته و میدان مغناطیسی که فاکتور کیفیت مورد نیاز q را برای یک جریان پلاسمایی مفروض تامین میکند،با فاکتوری به اندازه بیست برابر کاهش می یابد. درنتیجه پارامتر بتا درتوکامک های کروی دارای مقادیر بسیار بالایی است. از جمله مشکلاتی که در توکامک های کروی مطرح هست،این است که نمیتوان یک موج را بدون وجود پلاسما ایجاد کرد و همچنین نمی‌توان بدون وجود یک تبدیل چرخشی محصور،یک پلاسما را محصور کرد. در نتیجه باید دست کم

بعضی از پیچه های چنبره ای را داخل حفره قرار داد. برای رفع این مشکل روشی به نام تزریق باریکه خنثی وجود دارد که روش سودمندی برای گرمایش توکامک های بزرگ است.

منابع

.۱A.sykes(Culham),2008,The Development of the Spherical Tokamak,International Conference on Plasma Physics,Fukuoka,Japan

.۲S.Prager(University of wisconsin),Magnetic confinement Fusion Science Status and Challenges

.۳Y.K. M. Peng,D. J. Strickler,1986 Nucl. Fusion 26,769

.٤http://www-frep.ucsd.edu/ARIES/DOCS/ARIES-ST/