مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال پنجم، شماره ۵۵، بهمن ۱۴۰۲
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

گرمایش پلاسماوتولید جریان در راکتورگداخت هسته ای

محمد صدیق [۱]

[۱] کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

چکیده

رساندن پلاسما تاحد دماهای گداخت هسته ای توسط تزریق اتمهای خنثی و برانگیختن انواع مختلف امواج پلاسما انجام میگیرد. امواج پلاسما جهت تحریک جریان پلاسما بدون ترانسفورماتورها به کار گرفته میشوند که محرک جریان غیرالقایی نامیده می شود. برای گرمایش پلاسما وتولید میتوان به گرمایش اهمی و گرمایش کمکی اشاره کرد. بیشترین دمای قابل دستیابی توسط گرمایش اهمی به اندازه کافی برای استمرار رشد دما توسط توان آلفا،بزرگ نیست. گرمایش باریکه خنثی نوعی از گرمایش کمکی است. در این روش،باریکه ای پر انرژی از اتمهای دوتریم یا تریتیم خنثی را در پلاسما تزریق میکنیم و گرمایش به این صورت اتفاق می افتد. روش دیگر گرمایش کمکی،استفاده از امواج رادیو فرکانسی(RF)است. در این روش، امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا توسط چشمه های خارجی به سمت پلاسما ارسال می شوند.

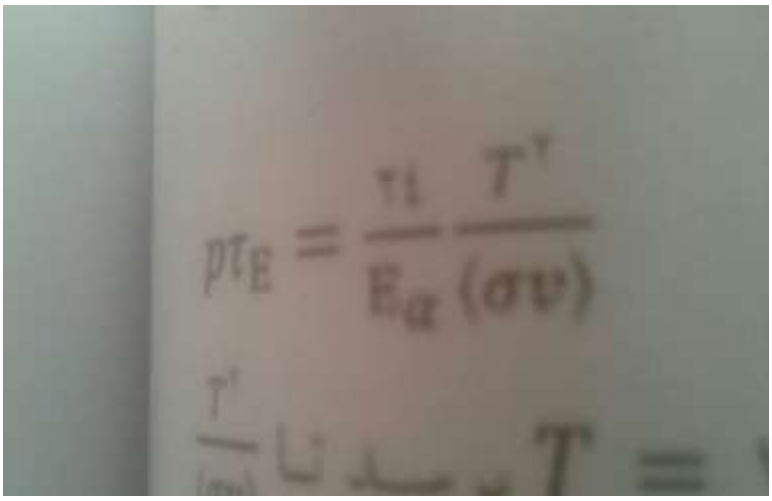
واژه‌های کلیدی: گرمایش، پلاسما،اهمی، کمکی، باریکه خنثی، امواج رادیو فرکانسی، توکامک، ایتر

۱. مقدمه

پلاسما حالت چهارم ماده است. پلاسما گاز یونیزه شده ای است که در آن الکترونها از هسته های اتمها جدا شده و ذرات باردار مثبت ومنفی درآن به طور مستقل حرکت میکنند. بنابراین چون ذرات پلاسما باردار هستند، جریان الکتریکی را هدایت نموده و با میدانهای مغناطیسی برهمکنش میکنند. رساندن پلاسما تا حد دماهای گداخت توسط تزریق اتمهای خنثی و برانگیختن انواع امواج پلاسما انجام میگیرد. به علاوه این امواج جهت تحریک جریان پلاسما بدون ترانسفورماتورها بکار گرفته میشوندکه محرک جریان غیر القایی نامیده میشوند. مسائل فیزیکی فراوانی وجود دارند که شامل این فرایندهاست. پرتوهای خنثی، سوخت پلاسما را تامین کرده و همچنین باعث ایجاد سرعت چرخشی پلاسما میشوند. بلکه برای تغییر شرایط موضعی داخل پلاسما و شکل دادن مشخصه جریان نیز به کار گرفته می‌شوند.

۲.گرمایش اهمی وگرمایش کمکی:

برای این که پلاسما در یک راکتور گداخت پایا مشتعل شود،لازم است در شرط اشتعال که به صورت زیر است،پیروی کند[۱].



رای کمینه کردن فشار وزمان محصورسازی راکتور لازم است دما به T=15kev برسد تاQV《 /T2》

کمینه شود.دستیابی به این دما در دو مرحله صورت میپذیرد. نخست اینکه ترکیبی از گرمایش اهمی وکمکی پلاسما را تا دمای حدود ۵-۷ kev می رسانند. دراین مرحله، توان آلفا ناچیز بوده و توان گرمایش می بایست بر اتلاف های ناشی از رسانش گرمایی و تابش ترمزی غلبه کند. در دمای بیش از ۵-۷kev توان آلفا غالب بوده و سبب گرمایش پلاسما تاT=15kev که دمای لازم برای اشتعال است، میشود. مقاومت پلاسما نسبت به دما با رابطه

ایتا متناسب است با T3/2/۱

کاهش می یابد.بنابراین با با افزایش جریان اهمی،بازدهی گرمایش نیز کاهش می یابد. طبق تحلیل، بر اساس پارامترهای متداول یک توکامک،بیشترین دمای قابل دستیابی توسط گرمایش اهمی در حدود Tکوچکتر یامساوی با ۳kev قرار دارد. مشخص است که این دما به اندازه کافی برای استمرار رشد دما توسط توان آلفا بزرگ نیست. در نتیجه به شکلهایی از گرمایش کمکی نیازمندیم. ابتدا گرمایش باریکه خنثی را بررسی میکنیم. دراین روش باریکه ای پرانرژی از اتمهای دوتریم یا تریتیم خنثی را در پلاسما تزریق میکنیم. گرمایش بدین صورت اتفاق می افتد. باریکه اتمهای خنثی از میدان مغناطیسی تاثیر نمی پذیرند. بنابراین اتمهای موجود در باریکه تا زمانی که در اثر برخوردها با پلاسما یونیزه نشوند،درمسیری مستقیم به درون پلاسما نفوذ میکنند. پس از یونیزه شدن،ذرات باریکه توسط میدانهای مغناطیسی محصور شده و به صورت تدریجی انرژی شان را در اثر برخورد های کولنی به پلاسما انتقال میدهند. از آنجا که ساز و کار گرمایش به برخوردهای کلاسیکی وابسته است،با

اطمینان میتوان از این روش برای گرمایش پلاسما در مقیاس یک راکتور گداخت استفاده کرد. به منظور گرمایش مناسب،انرژی باریکه به طور مشخصی باید ازدمای پلاسما بیشتر باشد. سطح انرژی مورد نیاز را از شرط لازم برای نفوذ باریکه در مرکز پلاسما جهت گرمایش مرکزی تعیین میکنیم. شرط یاد شده، مهمترین مسئله گرمایش باریکه خنثی به حساب می آیدکه از جنبه فن آوری دارای اهمیت است. سیستم های کنونی باریکه خنثی توسط چشمه های یون مثبت تولید میشوند که تا انرژی حدود ۱۰۰ kev از بازدهی بالایی برخوردارند وبرای آزمایشهای حال حاضر مناسبند. توکامک ایتر و سایر رآکتورها به دلیل چگالی بالاتر و ابعاد بزرگ ترشان به باریکه ای با انرژی حدود ۱Mev برای گرمایش مناسب نیازمندند. بدین منظور می بایست از چشمه های یون منفی در سیستم باریکه خنثی استفاده کنیم که به فن اوری بالایی نیازمند بوده و هنوز به سادگی قابل دستیابی نیست. تحقیقاتی گسترده و برنامه ای منسجم برای توسعه چنین چشمه های یون منفی در حال انجام است و پیش‌بینی میشود تا زمانی که راکتور ITER به آن نیاز پیدا کند، آماده بهره‌برداری خواهد بود. راهکار دیگر گرمایش کمکی، استفاده از امواج رادیو فرکانسی (RF)است. در این روش امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا توسط چشمه ای خارجی به سمت پلاسما ارسال میشوند. ساز وکار گرمایش پلاسما مشابه عملکرد اجاق مایکروویو است. وقتی فرکانس اعمال شده طوری با دقت انتخاب شود که با فرکانس تشدید طبیعی غذا یا در این حالت، پلاسما تطبیق داشته باشد، جذب شدید انرژی اتفاق می افتد که به گرما تبدیل میشود. در خصوص پلاسما چندین فرکانس تشدید طبیعی مورد توجه وجود دارند که عبارتند از :فرکانس های سیکلوترونی الکترون ها ویون ها و هارمونیک های سیکلوترونی شان.گرمایش در فرکانس های تشدید الکترون ها به گرمایش سیکلوترونی الکترون (ECH)معروف است. جنبه حالت توجه ECH وICHآن است که جذب تشدیدی توسط سازوکاری به نام ((تضعیف بدون برخورد))رخ میدهد.جذب به برخوردها نظیر آنچه در اجاق مایکروویو اتفاق می افتد، وابسته نیست. هر چند هردو روش ECH و ICH سبب جذب شدید انرژی در مرکز پلاسما میشوند،از جنبه مهندسی با چالشهایی نیز مواجه هستند. درخصوص ECH مسافت چشمه های جایروترون توان بالای پایدار در فرکانس مورد نیاز ۱۴۰ GHZ که هنوز ساخته نشده است، چالش اصلی به حساب می آید. در خصوص ICH مشکل اینجاست که برای تزویج مناسب انرژی موج به پلاسما لازم است آنتن ارسال کننده موج به سطح پلاسما خیلی نزدیک باشد. در نتیجه با معضل قوس و تخلیه الکتریکی بین پلاسما وآنتن مواجه خواهیم شد. تحقیقاتی ویژه و برنامه ای مدون در حال انجام است و پیش‌بینی می‌شود راه حل های مناسبی تا زمان استفاده از آن در رآکتور lTER پیدا شود. روی هم رفته گزینه مناسبی مرجح و مشخصی به عنوان سیستم گرمایش مورد استفاده در آزمایش هایی در مقیاس ITER وجود ندارد. چند گزینه در دسترس است. همه این گزینه ها از جنبه فیزیک پلاسما قادر به گرمایش مناسبی هستند. بر این اساس، در رآکتور ITER از سیستم های گرمایش چندگانه به منظور تعیین تجربی گزینه نهایی مطلوب که از قابلیت اطمینان بالا و هزینه قابل قبولی برخوردار باشد، استفاده خواهد شد.اکنون به موضوع تحریک جریان اشاره کنیم. همه روش های مورد بحث برای تحریک جریان غیر القایی پایا مناسب هستند. با این وجود، بر روی تحریک جریان هیبرید پایین تر (LHCD)به دلیل فرکانس بالاترش نسبت به سایر گزینه ها تمرکز خواهیم کرد. در این حالت مکانیسم کاهنده بدون برخوردی معروف به میرایی لاندائو سبب جریان غیرالقایی پایا میشود. به زبان ساده در این روش امواج به سمت پلاسما ارسال شده ودر یک جهت حول چنبره انتشار می یابد

این امواج الکترون ها را با خود میکشندومشابه امواج اقیانوس که موج سوار را هل می‌دهد، عمل می کنند.الکترونهای همراه با امواج سبب تحریک جریان میشوند. چشمه ها در محدوده مایکروویو جهت تحریک امواج هیبرید پایین تر دردسترس هستند. مشابه LHCD, ICH نیز با معضل نزدیکی سیستم موج بر لبه پلاسما جهت تزویج مناسب هستند. مهمتر اینکه بازدهی تحریک جریان هر چند از دیگر گزینه ها بالاتر است، تحریک کل جریان در یک راکتور توکامک خیلی پایین بوده و مقرون به صرفه نیست. در نتیجه رآکتور توکامک با هدف نیاز کمتر به سیستم تحریک جریان به جریان خود راه انداز نیازمندند.

نتیجه گیری :

برای گرمایش پلاسما و تولید جریان در رآکتور گداخت هسته‌ای راهکار ها و روش هایی مثل روش های اهمی وکمکی نیازمندیم. اگر از ترکیب گرمایش اهمی وکمکی پلاسما تا دمای حدود ۵-۷kev استفاده کنیم، توان آلفا ناچیز است و توان گرمایش باید بر اتلاف های ناشی از رسانش گرمایی و تابش مرکزی غلبه کند. در دمای بیش از ۵-۷kev, توان آلفا غالب است و سبب گرمایش پلاسما تاT=15kev که دمای لازم برای اشتغال است، میشود. در یک توکامک بیشترین دمای قابل دستیابی به وسیله گرمایش اهمی درحدود T بزرگتر یا کوچکتر از ۳kev قرار دارد. این دما به اندازه کافی برای استمرار رشد دما توسط توان آلفا بزرگ نیست. بنابراین به شکلهایی ازگرمایش کمکی نیازمندیم. یکی از روشهای گرمایش کمکی روش گرمایش باریکه خنثی است. در این روش باریکه ای پر انرژی از اتمهای دوتریم یا تریتیم خنثی در پلاسما تزریق می‌شود و گرمایش اتفاق می افتد. یکی دیگر از روشهای گرمایش کمکی، استفاده از امواج رادیو فرکانسی (RF)است.در این روش، امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا توسط چشمه ای خارجی به سمت پلاسما ارسال میشوند. در خصوص پلاسما چندین فرکانس تشدید طبیعی وجود دارند که عبارتند از :فرکانس های سیکلوترونی الکترون ها و یون ها و هارمونیک های سیکلوترونی شان. گرمایش در فرکانس های تشدید الکترون ها به گرمایش سیکلوترونی الکترون (ECH)معروف است. در ECH وICH جذب تشدیدی توسط تضعیف بدون برخورد رخ میدهد. دوروش ECH وICH باعث جذب شدید انرژی در مرکز پلاسما میشوند ولی از جنبه مهندسی با چالشهایی مواجه مواجه هستند. در ECH ساخت چشمه های جایروترون توان بالای پایدار در فرکانس مورد نیاز GHZ۱۴۰ که هنوز ساخته نشده است، چالش اصلی است. در مورد ICH, مشکل اینجاست که برای تزویج مناسب انرژی موج به پلاسما لازم است آنتن ارسال کننده موج خیلی به سطح پلاسما نزدیک باشد. در نتیجه، با معضل قوس وتخلیه الکتریکی بین پلاسما وآنتن روبرو خواهیم بود.درنهایت گزینه مرجح و مشخصی به عنوان سیستم گرمایشی مورد استفاده در آزمایش هایی در مقیاس ITER وجود ندارد و بنابراین در رآکتور ITER از سیستم های گرمایشی چند گانه به منظور تعیین تجربی گزینه نهایی مطلوب که از قابلیت اطمینان بالا و هزینه قابل قبولی برخوردار باشد،استفاده خواهد شد. برای تحریک جریان غیر القایی از روش تحریک جریان هیبرید پایین تر (LHCD)استفاده میشود. در این روش امواج به سمت پلاسما ارسال شده ودر یک جهت حول چنبره انتشار می یابند. مانند LHCD, ICH نیز با معضل نزدیکی سیستم ارسال موج به لبه پلاسما جهت تزویج مناسب مواجه هست.تحریک کل جریان در یک راکتور توکامک خیلی پایین بوده و مقرون به صرفه نیست. بنابراین با هدف نیاز کمتر به سیستم تحریک جریان، رآکتور توکامک به جریان خودراه انداز نیازمند است.

منابع(References):

۱.Freidberg J. ,Plasma Physics and Fusion Energy, 2007, Cambridge University Press.