



بررسی رانش جریان و گرمایش در توکامک کروی NSST با امواج هیبریدی پایین (LH)

اکبر پروازیان-مریم افخمی

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده‌ی فیزیک

چکیده

آزمایش‌های اخیر بر روی توکامک‌های کروی شرایط را برای ایجاد یک پلاسمای قدرتمند با شکل دهی آسان و تقویت حدود پایداری، محصور سازی انرژی و جریان خودراه‌انداز بالا کشف کرده است. برای توسعه‌ی مسیر، به عنوان یک انتخاب، دستگاه چنبره‌ی کروی مرحله‌ی بعدی، NSST آزمایش می‌شود. راکتور NSST با $I_p = 5-10 MA$ (جریان پلاσμα) و $R_p = 1/5 m$ (شعاع اصلی) و $B_T \leq 2/7 T$ (میدان مغناطیسی توروئیدی) و $A = 1/5$ (نسبت منظر) ساخته می‌شود که احتمال تغییر پارامترهای آن ممکن است. در این مقاله برهم‌کنش امواج هیبریدی پایین (LHW) در این توکامک، برای بالا بردن عملکرد توکامک و افزایش جریان و گرمایش در محیط پلاسمای توکامک مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه: ST و LHW و جریان رانشی

مقدمه:

تحقیقات بر روی توکامک‌های کوچک و دیگر هندسه‌های محصورسازی هنوز بخش مهمی از برنامه‌های همجوشی برای توسعه‌ی زمان تناوب در فرآیند همجوشی است. یکی از این تحقیقات، توکامک‌های کروی (ST) نامیده می‌شود. مسیر توسعه‌ی انرژی هم‌جوشی چنبره‌های کروی مکمل آزمایش‌های پلاسمای احتراقی مانند ITER است که به سمت دستگاه‌های آزمایشی مولفه‌های به هم پیوسته (CTF)^۲ و روش‌های توروئیدی β بالا برای بهبود طراحی توکامک

۱-Spherical Tokamak

۲-Component Test Facility

پیشرفته ی Demo^۳ و توکامک های نیروگاهی (power plant)، می رود [۱]. در مرحله ی توسعه ی انرژی همجوشی در توکامک های کروی، توکامک بعدی NSST^۴ است [۲].

اهداف NSST شامل موارد زیر است:

- ۱- فراهم کردن یک شرایط فیزیکی کافی برای طراحی CTF
- ۲- کشف عملکرد پیشرفته با نسبت جریان خودراه انداز بالا که می تواند در CTF، Demo و..... استفاده شود.
- ۳- همکاری و کمک در بخش علم پلاسمای تروئیدی بالا شامل اخترازیکی

گرمایش و رانش جریان:

اساس سیستم رانشی و گرمایشی برای راکتور NSST، استفاده از سیستم گرمایش باریکه ی خنثی (NBI) با توان ۳۰MW و سیستم سیکلوترونی یونی (ICRF) با توان ۱۰MW و هم چنین سیستم موج سریع هارمونیک بالا (HHFW)^۵ است [۳]. ما برهم کنش امواج هیبریدی پایین (LHW)^۶ را در دو راکتور NSST و NSTX^۷ بررسی و یک فرکانس و توان بهینه (منظور از بهینه کردن این است که موج بیش تر به مرکز پلاسمای نزدیک شود و جریان رانشی بیش تری را در این نواحی ایجاد کند). برای موج هیبریدی پایین برای آنها پیدا کردیم. در این جا شرایط بهینه برای موج هیبریدی پایین در این دو توکامک کروی را با یکدیگر بررسی و مقایسه می کنیم. برای بررسی برهم کنش امواج هیبریدی پایین از کد شبیه سازی امواج هیبریدی پایین (LSC)، که یک مدل محاسباتی رانش جریان امواج هیبریدی پایین است، استفاده کردیم. در این کد جزئیات هندسی، پروفایل پلاسمای و معادلات دوره ای مورد بحث قرار می گیرد [۴].

مقایسه ی توکامک های NSST، NSTX:

جدول ۱ پارامترهای پلاسمای را برای دو توکامک کروی NSTX و NSST مقایسه می کند:

۳- DEMONstration power plant

۴- Next Step Spherical Torus

۵- High Harmonic Fast Wave

۶- Lower Hybrid wave

۷- National Spherical Torus Experiment



جدول ۱- پارامترهای پلاسما

NSST	NSTX	پارامترهای پلاسما
۱/۲	۰/۸۵	شعاع اصلی (Ro(m))
۰/۹	۰/۶۸	شعاع فرعی (a(m))
۱/۳	۱/۲۵	نسبت منظر (A= R/a)
۱/۱ - ۲/۷	۰/۳ - ۰/۶	میدان مغناطیسی تروئیدی (BT(T))
۵-۱۰	۱/۴	جریان پلاسما (Ip(MA))
۵	۲	چگالی الکترون مرکزی ($n_{eo}(\times 10^{13} cm^{-3})$)
۲۰	۱/۵	دمای الکترون مرکزی (Teo(Kev))
۰/۴	۰/۲ - ۰/۴	بتای تروئیدی (β_t)

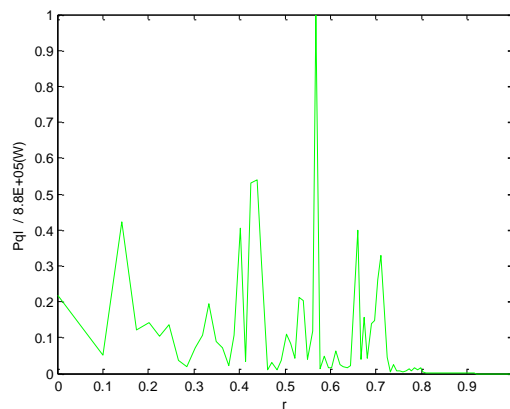
با ورود موج به داخل پلاسما تابع توزیع دچار اختلال شده و سیستم از حالت ماکسولی خارج می‌شود. توان شبه‌خطی الکترون‌ها به صورت زیر است:

$$P_{ql} = -n_e m_e \int dv_{\parallel} v_{\parallel} D_{ql}(v_{\parallel}) \frac{\partial f_e}{\partial v_{\parallel}} \quad -1$$

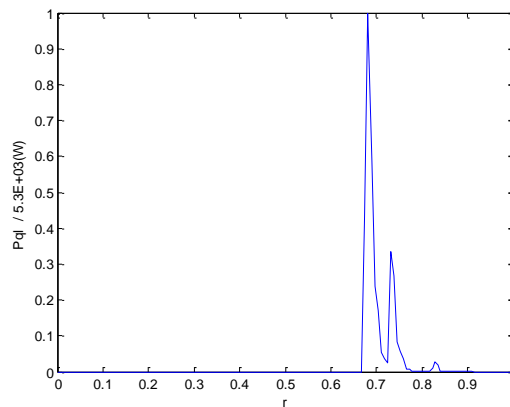
که برابر با انرژی بر واحد زمان بر واحد حجم است که از موج خارج شده و به ذره وارد می‌شود. در این جا $D_{ql}(v_{\parallel})$ ضریب پخش شبه‌خطی است و هنگامی غیر صفر است که، سرعت فاز موج برابر با سرعت موازی با میدان مغناطیسی ذره باشد (جذب لاندائو). $\partial f_e / \partial v_{\parallel}$ نیز تغییرات تابع توزیع الکترون بر اثر ورود موج LH به داخل پلاسما است.

در ابتدا توان شبه‌خطی حجمی الکترون‌ها را در فرکانس و توان بهینه برای دو توکامک (توان بهینه برای NSTX و NSST به ترتیب برابر ۲ MW و ۷ MW و فرکانس بهینه برابر ۴/۶ GHz و ۲/۹ GHz می‌باشد.) را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. با مشاهده‌ی نمودار نسبت پیک توان دریافت شده برای NSST حدود ۱۰۰ برابر NSTX است و این برای رانش جریان و گرمایش در پلاسمای NSST بسیار مطلوب است و نشان دهنده‌ی این است که در توکامک NSTX موج

بیش تری به سمت خارج پلاسما منعکس شده است. در توکامک‌های کروی نسبت به توکامک‌های چنبره‌ای به دلیل β ی بالا (β بهره‌ی محصورسازی پلاسماست که با توان همجوشی متناسب است) ، فرستادن موج LH زیاد موثر نیست اما در این جا مشاهده می‌کنیم که این توکامک بهبودیافته‌ی کروی با میدان مغناطیسی توروئیدی بالا (که یکی از خصوصیات توکامک‌های چنبره‌ای است) توانایی دریافت موج هیبریدی پایین (LH) در فواصل نزدیک به پلاسما (دارای شرایط مناسب برای فرایند همجوشی) را داراست.



(الف)



(ب)

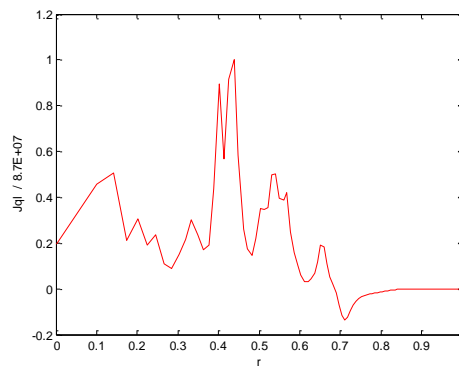
شکل ۲-مقایسه‌ی نمودارهای توان شبه‌خطی بر حسب فاصله‌ی بهنجار شده از مرکز پلاسما (الف) برای توکامک NSST و (ب) برای

توکامک NSTX .

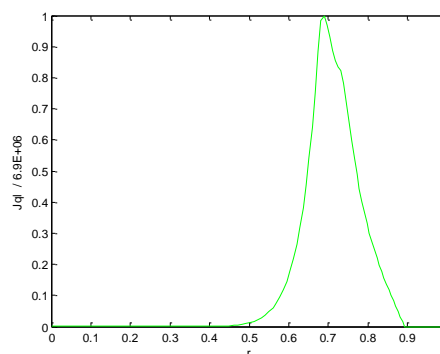
بر طبق رابطه‌ی چگالی جریان رانشی به صورت زیر داریم:

$$J_{rf} = \frac{-en_e}{\Gamma} \int dv_{\parallel} D_{q1}(v_{\parallel}) \frac{\partial f_e(v_{\parallel})}{\partial v_{\parallel}} \frac{v_{\parallel}^3}{5+Z} \left[\mu - \frac{1+Z/2+3\mu^2/2}{3+Z} \frac{v_{\parallel}^2}{v_T^2} \right] \quad -2$$

در این جا $\mu = -1$ برای رانش جریانی که هم جهت با میدان است و $\mu = +1$ برای رانش جریانی که خلاف جهت میدان است با جذب موج توسط ذره، انرژی ذره افزایش می‌یابد با ذرات دیگر کم‌تر برخورد کرده و با آهنگ کم‌تری انرژی از دست می‌دهد، بنابراین با سرعت بیش‌تری به حرکت خود ادامه داده و سبب رانش جریان در توکامک می‌شود و این همان چیزی است که در توکامک به آن نیاز داریم. زیرا گرمایش بیش‌تر و رانش بیش‌تر در پلاسما سبب پایا ماندن پلاسما در توکامک می‌شود و این پایایی سبب طولانی‌تر شدن زمان محصورسازی و در نتیجه بیش‌تر شدن فرایند همجوشی می‌شود. هرچه موج بیش‌تر به مرکز پلاسما نزدیک شود، پایایی جریان بیش‌تر است و پخش عمودی کم‌تر است. با توجه به شکل ۳ مرتبه‌ی پیک جریان رانشی برای توکامک *NSST* نسبت به توکامک *NSTX* حدود ۱۲ برابر است و از نظر نزدیکی به مرکز نیز توانسته است به مرکز نزدیک شود و این برای پلاسما مطلوب است زیرا هرچه چگالی جریان رانشی به مرکز نزدیک باشد احتمال پخش جریان کم‌تر و در نتیجه احتمال پایداری پلاسما افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- مقایسه‌ی نمودارهای چگالی جریان رانشی بر حسب فاصله‌ی بهنجار شده (الف) برای توکامک *NSST* و (ب) برای

توکامک *NSTX*

نتیجه گیری:

توکامک NSST، یک توکامک کروی است از طرفی، به دلیل میدان مغناطیسی توروئیدی بالا به توکامک‌های چنبره‌ای نیز شبیه است. مشاهده شد که کاربرد موج هیبریدی پایین در این توکامک که تلفیقی از توکامک کروی- چنبره‌ای است توانسته است عملکرد خوبی را نشان دهد.

با مشاهده نتایج به دست آمده مشاهده کردیم که کاربرد موج هیبریدی پایین در توکامک NSST نسبت به توکامک نسل قبل از خود یعنی NSTX مزیت‌های بسیار زیادی دارد از جمله این که بیش تر توان جذبی و جریان رانشی ناشی از موج هیبریدی پایین (LH) در نزدیکی مرکز پلاسما قرار گرفته است که این برای ایجاد گرمایش و شرایط همجوشی بسیار مفید است.

مراجع

- [۱] N. R. C. F. S. A. Committee and N. R. C. P. S. Committee, *An Assessment of the Department of Energy's Office of Fusion Energy Sciences Program*: National Academy Press, 2001.
- [۲] M. Peng, *et al.*, "Physics and engineering assessments of spherical torus component test facility," *Nucl. Fusion*, 2005.
- [۳] M. Ono, *et al.*, "Design Innovations of the Next-Step Spherical Torus Experiment and Spherical Torus Development Path," IAEA-CN-94/FT/1-42002.
- [۴] D. Ignat, *et al.*, "Lower Hybrid Simulation Code Manual," 2000