آهنگ ناپایداری پراکندگی رامان القایی در محدوده فرکانس‌های رادیویی موج تزریقی در توکامک کروی NSTX

[1]پروازیان، اکبر؛ نقی‌دخت، احمد

[1]دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

چکیده

یکی از چالش‌های اساسی در تزریق امواج به داخل پلاسما به وجود آمدن ناپایداری‌هایی است که باعث اتلاف انرژی موج تزریقی خواهند شد. یک نوع از این ناپایداری-ها که در گرمادهی به پلاسمای همجوشی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است پراکندگی رامان القایی است که در آن یک موج الکترومغناطیسی باعث برانگیختگی یک موج لانگمیر به همراه یک موج الکترومغناطیسی دیگر خواهد شد. آهنگ ناپایداری که یک پارامتر اساسی در ناپایداری به شمار می‌آید برای پراکندگی رامان القایی با موج عادی و فرکانس‌های ۲۸،۵۸،۱۲۸و۱۳۸گیگاهرتز در توکامک NSTX در این مقاله محاسبه گردیده است. آهنگ ناپایداری برای فرکانس ۲۸ گیگاهرتز دو مرتبه بزرگی بیش از سه فرکانس دیگر است که کارایی بالای این فرکانس در گرمادهی به توکامک NSTX را نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس موج تزریقی آهنگ ناپایداری به طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. افزایش دما و نیز پارامتر $k^2\lambda_d^2$ باعث افزایش آهنگ ناپایداری خواهد شد.

Instability Rate of Stimulated Raman Scattering in radio frequencies range of injection wave in spherical NSTX tokamak.

[1]Parvazian, Akbar ; Naghidokht, Ahmad

[1]Department of Physics, Isfahan University of Technology, Isfahan

Abstract

One of the basic challenges in the wave injection into the plasma is the creation of instabilities that leads to dissipation of the injection wave energy. One of these instabilities that much considered in heating to the fusion plasma is Stimulated Raman Scattering that in this instability an electromagnetic wave excites an electron plasma wave and another electromagnetic wave. The instability rate that is basic parameter in instability, for Stimulated Raman Scattering with ordinary (O-mode) wave and frequencies 28, 58, 128 and 138GHz in NSTX tokamak has been calculated in this paper. Instability rate for 28GHz is high by order two compare to other three frequencies that shows high efficiency of this frequency for heating of NSTX tokamak. With increase in frequency of the injection wave, the instability rate decreases sensitively. The increase of temperature and $k^2\lambda_d^2$ leads to the enhancement of instability rate.

PACS No.

مقدمه

یکی از روش‌های اساسی برای گرم‌کردن پلاسما تزریق امواج الکترومغناطیسی به داخل آن است. به دنبال تزریق موج به داخل پلاسما پارامترهای اساسی آن همچون چگالی و میدان‌های الکترومغناطیسی دچار اختلال خواهند شد که این پدیده اثر خود را به شکل ناپایداری‌ها نشان می‌دهد. به عبارتی ناپایداری‌ها به دنبال تزریق موج به داخل پلاسما به‌وجود می‌آیند و با توجه به اثرات اتلافی‌شان منجر به کاهش گرمادهی به‌محیط پلاسما خواهند شد. موج الکترومغناطیسی تزریقی به داخل پلاسما که به عنوان موج پمپ مطرح می‌باشد در نتیجه‌ی جفت‌شدگی با امواج داخل پلاسما همچون موج لانگمیر و نیز موج یون صوتی باعث برانگیخته‌شدن مدهای جدید خواهد شد. کاهش این ناپایداری‌ها از چالش‌های اساسی در روش‌های محصورسازی به منظور همجوشی هسته‌ای است اما موج لانگمیر و نیز موج یون صوتی

حاصل از این ناپایداری‌ها می‌توانند داخل پلاسما میرا شده و انرژی خود را به پلاسما منتقل کنند که می‌تواند در بحث گرمادهی به پلاسما مفید باشد. دو نوع بسیار مهم از این ناپایداری‌ها یعنی پراکندگی رامان و بریلوئن القایی در بحث گرمادهی و گرم‌کردن پلاسمای همجوشی بیش از بقیه مورد توجه می‌باشند. در پراکندگی رامان القایی یک موج الکترومغناطیسی (موج پمپ) منجر به برانگیختگی یک موج لانگمیر و یک موج الکترومغناطیسی دیگر می‌شود (امواج دختر). چنانچه موج لانگمیر با موج یون صوتی جایگزین شود پراکندگی بریلوئن القایی را خواهیم داشت[۱].

تحول تابع توزیع

اساسی‌ترین معادله برای توصیف یک پلاسمای بدون برخورد معادله ولاسوف می‌باشد که به صورت زیر است:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{\mathbf{v}}.\frac{\partial f}{\partial \vec{\mathbf{r}}}+\vec{\mathbf{a}}.\frac{\partial f}{\partial \vec{\mathbf{v}}}=0 \qquad (۱)$$

برای پلاسماهای با دمای بالا که در آن تعداد برخوردها بسیار کم‌اند معادله ولاسوف کاربرد پیدا می‌کند. به دنبال تزریق یک موج الکترومغناطیسی به داخل پلاسما افت‌وخیزهای شدیدی در تابع توزیع الکترونی رخ می‌دهد که این آشفتگی نقش اساسی در ناپایداری ایفا می‌کند.

آهنگ ناپایداری

در بیشتر مواقع موج پراکنده‌شده در نتیجه ناپایداری یک موج پس‌پراکنده بوده و موج پراکنده‌شده رو به جلو سهم چندانی نخواهد داشت. به منظور جفت‌شدگی مدهای موجی داخل پلاسما باید شرایط تشدیدی و تطبیق برای فرکانس و عدد موج با توجه به پایستگی انرژی و تکانه برقرار شود:

$$\omega_0=\omega_1+\omega_2 \qquad (۲)$$

$$\mathbf{k}_0=\mathbf{k}_1+\mathbf{k}_2 \qquad (۳)$$

شاخص صفر موج پمپ و شاخص‌های ۱ و ۲ امواج دختر حاصل را نمایش خواهند داد.

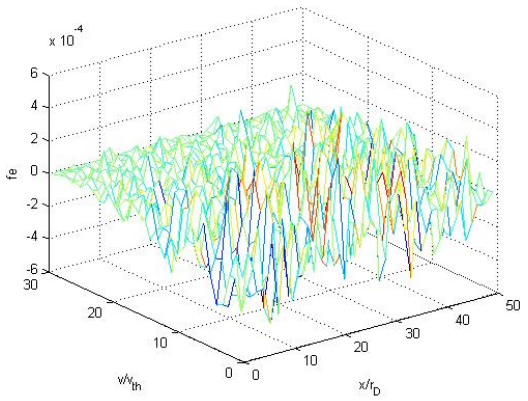
با توجه به اهمیت فراوان ناپایداری‌ها در بحث گرمادهی به پلاسما این موضوع به طور گسترده‌ای در محصورسازی به روش لختی و نیز پلاسمای مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است[۲و۳و۴و۵]. یکی از مهم‌ترین پارامترها در بحث ناپایداری، آهنگ ناپایداری است که می‌تواند رشد یا میرایی ناپایداری در داخل پلاسما را به خوبی نمایش دهد. با در نظر گرفتن روابط پاشندگی هر کدام از سه مد موجی و روابط مربوط به معادلات موج جفت‌شده می‌توان به یک رابطه پاشندگی غیرخطی دست پیدا کرد که با در نظر گرفتن این رابطه برای پراکندگی رامان القایی وبا فرض یک قسمت موهومی برای فرکانس به صورت $\omega=\omega_r+i\gamma$ می‌توان عبارتی برای آهنگ ناپایداری (γ)پراکندگی رامان القایی به صورت زیر به دست آورد[۶]:

$$\gamma=\frac{kv_{os}}{4}\left(\frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ek}(\omega_0-\omega_{ek})}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (۴)$$

که در آن $v_{os}=\frac{q_eE}{m_e\omega_0}$ سرعت نوسانی الکترونی و $\omega_{ek}^2=\omega_p^2+3k^2v_{th,e}^2$ فرکانس بوهم-گروس برای موج لانگمیر می‌باشد. q_e و m_e به ترتیب بار و جرم الکترونی، E دامنه میدان الکتریکی، ω_0 فرکانس موج پمپ، $v_{th,e}^2=\frac{2kT}{m_e}$ مجذور سرعت گرمایی الکترونی، $\omega_{pe}^2=\frac{ne^2}{\varepsilon_0 m_e}$ مجذور فرکانس نوسانات پلاسما و ε_0 ضریب گذردهی خلا می‌باشد.

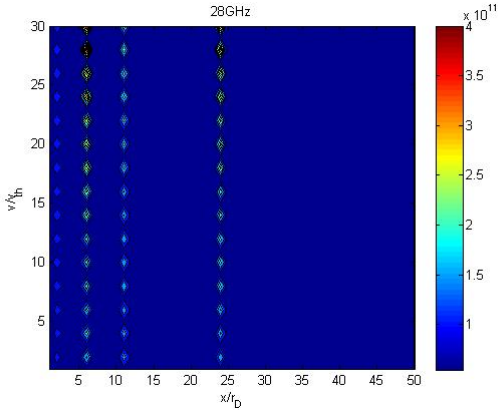
شبیه‌سازی آهنگ ناپایداری برای توکامک NSTX

در اینجا محاسبات مرتبط با آهنگ ناپایداری رامان القایی را برای توکامک NSTX انجام داده‌ایم. چگالی میانگین برای این توکامک $۱۰^{۱۹}\mathrm{m}^{-3}$ منظور شده است. با تعریف میدان‌های الکترومغناطیسی بر اساس پتانسیل‌های الکترودینامیکی می‌توان با مدنظر قراردادن شرط لورنتز به معادلات موج ناهمگن لورنتز رسید. حل عددی معادلات ولاسوف- ماکسول با استفاده از تبدیلات فوریه در فضای فاز (x, v) تحول کلی تابع توزیع را در فضای فاز ((x, v) ودر زمان‌های متفاوت ارائه می‌کند که حاکی از پیشرفت زمانی توزیع ماکسولی ذرات پلاسما به سوی تعادل است که در این مسیر آشفتگی‌های فراوانی را نیز شاهد هستیم. برای محاسبات مربوط به تحول زمانی از روش Runge-Kutta مرتبه چهار استفاده شده است. با داشتن تابع توزیع و به تبع آن چگالی پلاسما می‌توان آهنگ ناپایداری را از معادله (۴) محاسبه کرد.با توجه به اینکه برای گرم‌کردن پلاسمادر محصورسازی به روش مغناطیسی از امواج رادیویی استفاده می‌شود لذا در اینجا مقادیر فرکانس موج تزریقی ۲۸ و ۵۸ گیگاهرتز درنظر گرفته شده‌اند. فرکانس ۲۸ گیگاهرتز به عنوان فرکانس مشخصه توکامک NSTX مطرح می‌باشد[۷]. همچنین موج پمپ یک موج عادی در نظر گرفته شده است که رابطه پاشندگی برای آن به صورت $\omega_0^2 = \omega_p^2 + k^2c^2$ است. شرایط اولیه در محاسبات به‌صورت $kT = 300eV$، $v_{os} = v_{th,e} \sim 10^6 \frac{m}{s}$ و $k^2\lambda_d^2 = 0.2$ منظور شده است. تابع توزیع الکترونی در گام زمانی ۲۰۰۰۰ در شکل (۱) آورده شده است که در آن آشفتگی وسیعی مشاهده می‌شود. در نتایج حاصل برای تابع توزیع الکترونی و آهنگ ناپایداری تعداد سلول‌های مکانی ۵۰ و تعداد سلول‌های سرعت ۳۰ در نظر گرفته شده است که به مقادیر متناظر (r_D, v_{th}) بهنجار شده‌اند.

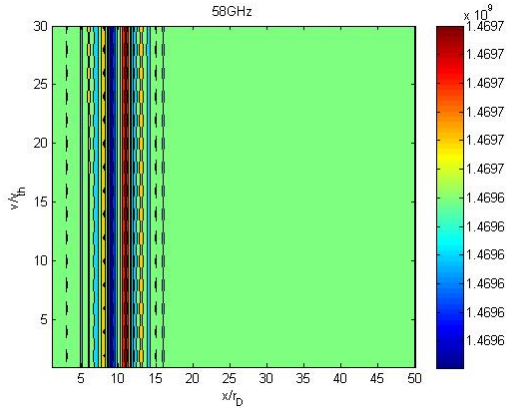


شکل۱: تحول تابع توزیع الکترونی در $\omega_{pe}t = 20000$.

شکل‌های (۲) و (۳) آهنگ ناپایداری را برای دو فرکانس ۲۸ و۵۸ گیگاهرتز نشان می‌دهند که تاثیر زیاد افت‌وخیزهای چگالی بر آهنگ ناپایداری نمایان است.



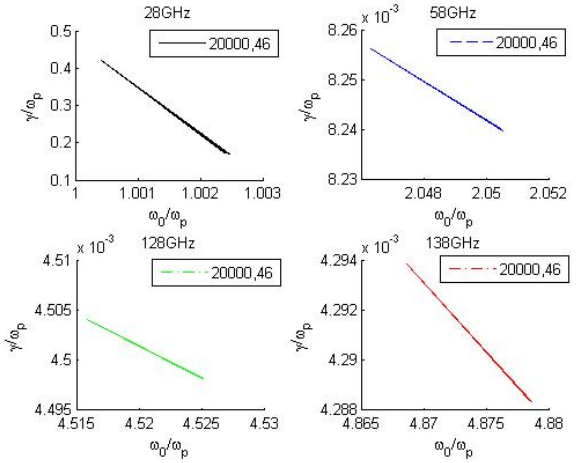
شکل۲:آهنگ‌ناپایداری برای‌فرکانس ۲۸گیگاهرتز در $\omega_{pe}t = 9000$.



شکل۳:آهنگ‌ناپایداری برای‌فرکانس۵۸گیگاهرتز در $\omega_{pe}t = 1000$.

آهنگ ناپایداری بهنجارشده برحسب فرکانس پلاسما در مقابل فرکانس موج پمپ بهنجارشده بر حسب فرکانس پلاسما برای

فرکانس‌های ۲۸،۵۸،۱۲۸و۱۳۸ گیگاهرتز در شکل (۴) نشان داده شده است که روند میرایی موج تزریقی و گرمادهی به پلاسما از این شکل معلوم می‌باشد.



شکل۴: آهنگ ناپایداری در فرکانس‌های ۲۸،۵۸،۱۲۸و۱۳۸گیگاهرتز برای سلول مکانی۴۶ و $\omega_{pe}t = 20000$.

به منظور بررسی تاثیر دما و نیز پارامتر $k^2\lambda_d^2$ بر آهنگ ناپایداری، مقدار بیشینه این آهنگ برای مقادیر $kT = 500,1000eV$ و نیز $k^2\lambda_d^2 = 0.3,0.4$ محاسبه و در جدول (۱) آورده شده است. افزایش دما و پارامتر $k^2\lambda_d^2$ منجر به افزایش آهنگ ناپایداری خواهند شد.

جدول ۱: تاثیر افزایش دما و پارامتر $k^2\lambda_d^2$ بر آهنگ ناپایداری برای فرکانس ۲۸گیگاهرتز.

	$k^2\lambda_D^2 = 0.3$		$k^2\lambda_D^2 = 0.4$	
	$500eV$	$1000eV$	$500eV$	**1000eV**
$\gamma_{max}(\times 10^{12})$	۱/۲۸	۱/۷۲	۱/۴۸	۱/۹۸

نتیجه‌گیری و بحث

مقدار آهنگ ناپایداری برای فرکانس ۲۸ گیگاهرتز در کل دومرتبه بزرگی بیش از مقدار آهنگ ناپایداری برای فرکانس‌های ۲۸،۵۸،۱۲۸و۱۳۸ گیگاهرتز می‌باشد که این نکته مزیتی مهم برای فرکانس ۲۸ گیگاهرتز در توکامک NSTX محسوب می‌شود چرا که این میزان بالای ناپایداری که بامیرایی همراه خواهد شد در بحث گرمادهی به پلاسما بسیار مهم می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش فرکانس موج تزریقی آهنگ ناپایداری به طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. همچنین افت‌وخیزهای چگالی باعث نوسانات شدیدی در آهنگ ناپایداری خواهد شد چرا که این افت‌وخیزها جفت‌شدگی مدهای موجی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. تاثیر افزایش دما و پارامتر $k^2\lambda_d^2$ در رشد آهنگ ناپایداری از طریق ارتباط با رشد موج لانگمیر قابل توجیه است چرا که افزایش این دو عامل باعث رشد موج لانگمیر و به دنبال آن رشد ناپایداری خواهند شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که فرکانس ۲۸ گیگاهرتز گزینه مناسبی برای گرم‌کردن پلاسما در توکامک NSTX می‌باشد.

مراجع

[۱] Bellan, P.M., *"Fundamental of Plasma Physics*", Pasadena, California, (2004).
[۲] Kumar, A., Tripathi, V.K., "*Parametric decay of X-mode radiation into electron Bernstein and lower hybrid waves in a plasma"*, Phys. Scr. **82** (2010) 025501 (4pp).
[۳] Liu, C.S., Tripathi, V.K., "*Interaction of electromagnetic waves with electron beams and plasmas*", world scientific publication, singapore (1994), p 115.
[۴] Eliezer, S., "*The Interaction of High-Power Lasers With Plasmas*", institute of Physics publications, Bristol and Philadelphia, (2002).
[۵] Kumar, A., Tripathi, V.K., "*Parametric Coupling of a Lower Hybrid Pump with neutral beam driven Ion Cyclotron Instability in a tokamak*", physics of plasmas **15**, 062509 (2008).
[۶] Kruer, W.L., "*The Physics of Laser Plasma Interaction*", Addison-Wesley press, (1988), p.78.
[۷] Ram, A.K., Schultz, S.D., " *Excitation, Propagation, and Damping Of Electron Bernstein Waves In Tokamaks*", Plasma Science & Fusion Center Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts (2000), 02139.