



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مطالعه اثر گرادیان چگالی قرص سوخت بر ناپایداری الکترومغناطیسی ویبل در فرایند اشتعال سریع همجوشی لختی

مهدوی، محمد - خدادادی آزادینی، فاطمه*

دانشگاه مازندران، دانشکده علوم، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:

یکی از موضوعات جالب تحقیقات سالهای اخیر در همجوشی لختی، بررسی ناهمسانگردی دمایی حاصل از انتشار الکترونیهای نسبیتهی در پلاسمای قرص سوخت است. در این مقاله، اثر گرادیان چگالی سوخت همجوشی بر نرخ رشد ناپایداری الکترومغناطیسی ویبل بررسی شده است. نتایج نشان داده شده است که با پیشروی باریکه الکترون نسبیتهی به سمت مرکز قرص، نرخ رشد ناپایداری ویبل ابتدا افزایش مییابد و به حداکثر مقدار خود می رسد، سپس به آرامی در مجاورت مرکز قرص سوخت ناپایداری ویبل کاهش مییابد. همچنین، با افزایش پارامتر نسبیتهی و جرم نسبیتهی الکترون، نرخ رشد ناپایداری ویبل کاهش مییابد. همچنین، کاهش گرادیان چگالی با ضریب ۱۰۰ و افزایش پارامتر نسبیتهی با ضریب ۲، منجر به کاهش ۷۸ درصدی نرخ رشد ناپایداری ویبل شده است.

کلمات کلیدی: ناپایداری ویبل، همجوشی محصورسازی لختی، الکترون نسبیتهی، گرادیان چگالی و پلاسمای نسبیتهی.

مقدمه:

طرح اشتعال سریعدر همجوشی به روش محصورسازی لختی، طرح متفاوتی است که در آن یک محرک لیزری 10^{20} w/cm^2 برای اشتعال هدف از پیش متراکم شده استفاده می شود [۱]. شدت بالای لیزردر برهمکنش لیزر- پلاسمای الکترونیها را تا سرعت فوق حرارتی شتاب می دهد و الکترونیهای نسبیتهی را تولید می کند. جریان الکترون نسبیتهی، میدان مغناطیسی را به وجود می آورد که منجر به انقباض پلاسمای و در نتیجه افزایش چگالی جریان می شود. انتشار باریکه الکترون در پلاسمای، وقتی جریان باریکه بزرگتر از جریان آلفن شود، توسط میدان مغناطیسی متوقف می شود. جریان آلفندر حد نسبیتهی برابر با $I_A = 17\beta\gamma \text{ (kA)}$ است [۲]. این چنین سیستمهایی نسبت به هر



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

آشفتگی هارمونیکی ناپایداری و مدهای الکترومغناطیسی که بطور نمایی با زمان رشد می کنند، تولید می کنند [۳ و ۴]. این مدهای ناپایدار می توانند باریکه ها را واگرا کرده و تعداد الکترونها را داغی که به مرکز سوخت می رسند را کاهش دهند که نتیجه آن پیش گرمایش قرص سوخت است. ناپایداری ویبل یکی از ناپایداریهای پلاسما است که توسط ناهمسانگردی تابع توزیع سرعت حاصل می شود [۹-۱۰]. ناهمسانگردی اولیه مورد نیاز برای برانگیختگی ناپایداری ویبل، توسط ناهمسانگردی دمایی حاصل از فرایند جذب انرژی و یا حضور کانترهای جریان حاصل می شود [۱۱-۱۴]. در انتقال باریکه الکترون نسبی از هاله پلاسما سوخت تا مرکز سوخت همجوشی چگالی قرص در حال افزایش است. همچنین، ناپایداری ویبل موجب توقف باریکه الکترون و مانع نهشت انرژی می شود. بنابراین، کنترل نهشت انرژی باریکه الکترون نسبی در پلاسما سوخت از طریق طراحی سوخت با گرادیان چگالی مناسب امکان پذیر خواهد بود. هدف از این کار، بررسی شرایط تثبیت ناپایداری ویبل در سوخت همجوشی به منظور بهینه شرایط اشتعال قرص همجوشی می باشد.

تئوری :

در طرح اشتعال سریع، انتشار باریکه الکترون نسبی از هاله پلاسما قرص سوخت تا مرکز قرص، در سیستمی فوق العاده ناپایدار صورت می گیرد. مرکز سوخت حدود چهار مرتبه چگالتر از هاله در لبه قرص سوخت است. در نتیجه باریکه الکترون در امتداد مسیر انتشارش به سمت مرکز قرص سوخت با یک گرادیان چگالی مواجه است (**Error! Unknown switch argument.**). به طوری که، نهشت انرژی باریکه الکترون در پلاسما به گرادیان چگالی بستگی پیدا خواهد کرد. باریکه قبل از رسیدن به مرکز سوخت، اغلب انرژی خود را در فاصله کوتاهی به پلاسما منتقل می کند. برای بررسی اثر گرادیان چگالی سوخت در رشد ناپایداری ویبل نسبی، این فرایند در دماهای نسبی بررسی شده است. دمای غیر نسبی پلاسما تقریباً 10 keV است. باریکه الکترونی با انرژی 4 MeV ، که انرژی آن بیش از انرژی انتشار 0.5 MeV است، نسبی است. برای این منظور، دینامیک الکترونها به کمک معادله والاسوف نسبی بررسی می شود. رابطه پراکندگی خطی ناپایداری ویبل از حل معادله والاسوف نسبی بدست می آید:

$$\frac{\partial}{\partial t} \quad (1)$$

تابع توزیع اولیه الکترونها نسبی با ناهمسانگردی دمایی بصورت زیر تعریف می شود:

$$f_i \quad (2)$$

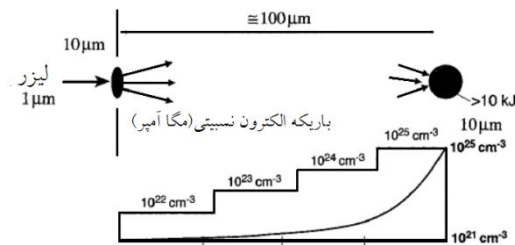
جائیکه $\gamma' = \left(1 + \eta \frac{p_{\parallel}^2}{m_e^2 c^2} + \frac{p_{\perp}^2}{m_e^2 c^2}\right)^{1/2}$ فاکتور لورنتس نسبی تحت گرادیان چگالی قرص سوخت $\eta = \left(\frac{n_0}{n_e(z,t)}\right)^2$ مولفه عرضی فاکتور لورنتس نسبی، $K_1(a)$ تابع بسل اصلاح



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شده نوع دوم مرتبه اول، $a = m_e c^2 \gamma_{\perp} / T_{\parallel}$ کمیت بدون بعد است. در سیستم نسبیتی، دمای مؤثر در جهت عمود و موازی نسبت به جهت انتشار موج با روابط زیر تعریف می شود.



انتشار باریکه الکترون نسبیتی مگا الکترون ولتی در میان گرادیان چگالی سوخت

$$T \quad (۳)$$

$$T \quad (۴)$$

$$a' = m_e c^2 \sqrt{\eta} \gamma_{\perp} / T_{\parallel} \quad a = m_e c^2 \gamma_{\perp} / T_{\parallel} \quad \alpha = \eta \sqrt{1 + \left(\frac{p_{\parallel}}{m_e c \gamma_{\perp}}\right)^2} \quad \hat{p}_{\perp}^2 = \frac{2m_e \gamma_{\perp}}{\sqrt{\eta}} T_{\perp} \frac{K_1(a)}{K_0(a')} \quad \text{با تعریف}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{a'}{2}} \frac{\xi}{kc} \quad \text{و تابع توزیع پراکندگی،}$$

$$Z \quad (۵)$$

با استفاده از فرمول پلملج، تابع پراکندگی برابر است با:

$$Z \quad (۶)$$

که P بیانگر قسمت حقیقی تابع پراکندگی است. برای حل رابطه پراکندگی و محاسبه نرخ رشد ناپایداری ویبل، باید معادله در حالت‌های حدی $|\xi| \gg 1$ و $|\xi| \ll 1$ بررسی شود. در حد $|\xi| \gg 1$ ناپایداری ویبل یک موج فرکانس پایین $|\omega| \gg |ck|$ است که جمله موهومی $i\pi e^{-\xi^2} \rightarrow 0$ و تابع پراکندگی پلاسما عبارت است از:

$$Z \quad (۷)$$

در حد $|\xi| \ll 1$ ، $(|ck| \ll |\omega|)$ ، تابع پراکندگی با معادله زیر بیان می شود:

$$Z \quad (۸)$$

با جایگذاری تابع پراکندگیدر رابطه پراکندگی خواهیم داشت:



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

$$(9)$$

با توجه به اینکه $\omega = \omega_r + i\delta$ است، نرخ رشد ناپایداری ویبل، $\delta = Im\omega$ ، برابر است با:

$$\delta \quad (10)$$

بطوریکه، $\beta = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}}$ است. برای بررسی اثر گرادیان چگالی قرص سوخت بر نرخ رشد ناپایداری ویبل، چگالی به صورت نمائی $n_e(z, t) = n_0 \exp(z/l)$ تعریف شده است، که l طول مشخصه گرادیان چگالی است. همچنین، اختلال کوچک چگالی میان دو پوسته چگال سرد و داغ قرص سوخت بصورت e^{kt} رشد خواهد کرد **Error!**

Reference source not found. که در آن

$$\kappa \quad (11)$$

جائیکه ρ_h و ρ_c چگالی پلاسمای سرد و داغ سوخت همجوشی، $g = P/\rho\Delta R$ شتاب، P فشار، ΔR ضخامت گامهای گرادیان چگالی، $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ است. با فرض اینکه $\frac{\Delta R}{R} \sim 8$ و $\frac{(\rho_h - \rho_c)}{(\rho_h + \rho_c)} < 1$ ، چگالی قرص سوخت همجوشی را می توان بصورت زیر تعریف کرد

$$n \quad (12)$$

که $n_0 = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ چگالی اولیه الکترون و $T_{e0} = 500 \text{ eV}$ دمای اولیه پلازما است. بنابراین، دامنه تغییرات اعداد موج ناپایدار برابر است با $0 < k < \omega_{pe} \sqrt{\left((1.25(1+4a)\beta \frac{K_0^2(a')}{K_1(a)}) / a^2 \eta^{\frac{3}{4}} \right) - 1}$ مقدار η در بین بازه صفر و یک تعریف می شود.

نتایج:

گسترش دمایی و کاهش T_{\perp} و T_{\parallel} به علت گرادیان چگالی در سوخت همجوشی منجر به تغییرات سریع قابل توجهی در T_{\perp} و T_{\parallel} در اطراف $\eta = 0.1$ خواهد شد. ناهمسانگردی دمایی در محدوده $0.001 < \eta < 0.01$ به دلیل گسترش دمایی، با ضریب 1.3 کاهش می یابد با کاهش η به سمت مرکز قرص سوخت، حداکثر نرخ رشد ناپایداری δ_{max}/ω_{pe} ، عدد موج مربوط به بیشینه ناپایداری k_{max} و بیشینه عدد موج ناپایداری k_{cut} کاهش می یابد. **Error! Unknown switch argument.** این بدین معنی است که انرژی کمتری از باریکه الکترونی به مرکز قرص سوخت منتقل می شود. کاهش ۹۹ درصدی گرادیان چگالی منجر به کاهش حدود ۸۲ درصد نرخ



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

رشد ناپایداری می شود. علاوه بر این، افزایش ۵۰ درصدی پارامتر نسبیتهی منجر به حدود ۲۰ درصد کاهش در نرخ رشد می شود. این موضوع را می توان به افزایش جرم نسبیتهی باریکه الکترون که باعث آهسته تر شدن حرکت الکترونها و در نتیجه کاهش جریان باریکه می شود، نسبت داد. بنابراین، کاهش گرادیان چگالی، η ، با ضریب ۱۰۰ و افزایش پارامتر نسبیتهی، γ ، با ضریب ۳، منجر به حدود ۸۸ درصد کاهش نرخ رشد و حدود ۸۷ درصد کاهش k_{max} می شود. در **Error! Unknown switch argument.**، نرخ رشد به عنوان تابعی از گرادیان چگالی سوخت نشان داده شده است. نرخ رشد در ابتدا با فاصله از هاله پلاسمای سوخت افزایش می یابد و به حداکثر مقدار خود می رسد. سپس به آرامی در فاصله کوچکی از مرکز سوخت کاهش می یابد. معادله (۱۳) بیانگر این است که برای $\eta < \eta_c$ ، نرخ رشد ناپایداری بطور یکنواخت با افزایش η به سمت هاله پلاسمای در لبه قرص سوخت، افزایش می یابد. در واقع، η_c موقعیتهی در قرص سوخت را نشان می دهد که نرخ رشد به حداکثر مقدار خود می رسد و به صورت $\gamma_{\perp}^2 = 0.36(kc/\omega_{pe})^4 (K_1(a)/K_0(a'))^2$ تعریف می شود. برای $\eta < \eta_c$ ، نرخ رشد ناپایداری با کاهش η ، به سمت مرکز قرص سوخت، شروع به کاهش می کند.

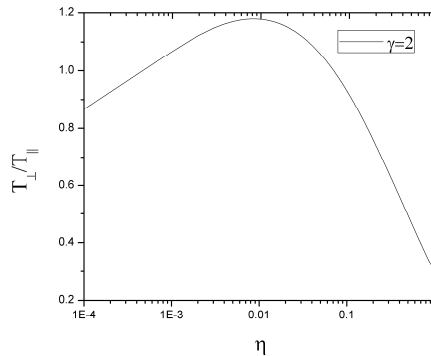
$$\frac{d}{d} \quad (13)$$

به محض این که باریکه الکترون نسبیتهی به مرکز سوخت برسد، برای $kc/\omega_{pe} < 0.1$ ، ناپایداری ویبل ناپدید می شود. هنگامی که $kc/\omega_{pe} > 0.1$ ، در ابتدا نرخ رشد ناپایداری افزایش و سپس با کاهش η ، کاهش می یابد و به مقدار ثابتی که مستقل از η است، گرایش دارد. برای مثال، وقتی η کوچکتر از ۰.۱ است، برای $kc/\omega_{pe} = 0.1$ ، ناپایداری نمی تواند وجود داشته باشد. اما برای $kc/\omega_{pe} = 0.5$ ، ناپایداری ویبل ناپدید نخواهد شد و نرخ رشد ناپایداری به مقدار ثابتی میل می کند. بنابراین، طول موجهای بلندتر در پلاسمای نسبیتهی قرص سوخت، تمایل بیشتری به ثبات ناپایداری نشان می دهند. بنابراین، در طول موجهای کوتاه عمل انتقال انرژی لیزر به مرکز سوخت بهتر صورت می گیرد.

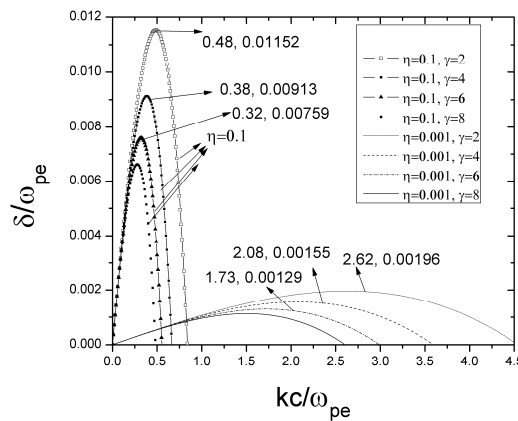


بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

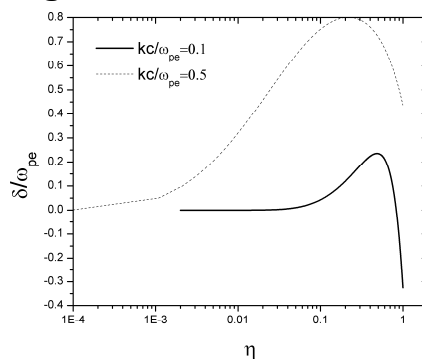
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



ناهمسانگردی دمایی برحسب گرادیان چگالی در پلاسمای نسبیتی با $\gamma = 2$.



نرخ رشد ناپایداری ویبل نرمالیزه شده δ/ω_{pe} ، بر حسب عدمموج نرمالیزه شده kc/ω_{pe}



نرخ رشد ناپایداری ویبل نرمالیزه شده δ/ω_{pe} ، بر حسب گرادیان چگالی η ، برای عدمموج مختلف

بحث و نتیجه گیری :

برای بررسی تاثیر گرادیان چگالی سوخت در نرخ رشد ناپایداری ویبل نسبیتی، دینامیک الکترونها توسط معادله والاسوف نسبیتی بررسی شده است. تابع توزیع اولیه الکترونها، نسبیتی با ناهمسانگردی دمایی تعریف می شود. نتایج نشان می دهد که برای $\eta > \eta_c$ ، نرخ رشد ناپایداری



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بطور یکنواخت با افزایش η به سمت هاله پلاسما در لبه قرص سوخت، کاهش می‌یابد. برای $\eta < \eta_c$ نرخ رشد ناپایداری با کاهش η ، به سمت مرکز قرص سوخت، شروع به کاهش می‌کند. کمیت η_c موقعیتی در قرص سوخت را نشان می‌دهد که نرخ رشد به حداکثر مقدار خود می‌رسد. برای $\eta > \eta_c$ ، این می‌تواند به جفت شدن باندهای جانبی با سرعت الکترون نوسانی نسبیته نسبت داده شود که یک جریانی که نرخ رشد ناپایداری ویبل را افزایش می‌دهد، تولید می‌کند. اما برای اختلال چگالی $\eta < \eta_c$ ، گسترش دمایی الکترونها پر انرژی، نرخ رشد را کاهش می‌دهد. برای $kc/\omega_{pe} < 0.1$ ، در نزدیکی هاله پلاسما با حرکت باریکه الکترون نسبیته به سمت مرکز سوخت، ناپایداری ویبل در ابتدا نرخ رشد ناپایداری افزایش و سپس با کاهش η ، کاهش می‌یابد و ناپدید می‌شود. هنگامی که $kc/\omega_{pe} > 0.1$ ، با کاهش η ، نرخ رشد ناپایداری کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی که مستقل از η است، میل می‌کند. بنابراین، طول موجهای بلندتر در پلاسما نسبیته قرص سوخت، تمایل بیشتری به ثبات ناپایداری نشان می‌دهند. محاسبات نشان داده‌اند که افزایش ۵۰ درصدی پارامتر نسبیته منجر به حدود ۲۰ درصد کاهش در نرخ رشد ناپایداری می‌شود. این موضوع را می‌توان به افزایش جرم نسبیته باریکه الکترون که باعث آهسته تر شدن حرکت الکترونها و در نتیجه کاهش جریان باریکه می‌شود، نسبت داد. همچنین، کاهش گرادیان چگالی، η ، با ضریب ۱۰۰ و افزایش پارامتر نسبیته، γ ، با ضریب ۳، منجر به حدود ۸۸ درصد کاهش نرخ رشد و حدود ۸۷ درصد کاهش عدد موج k_{max} می‌شود. بنابراین، با انتخاب مناسبی از گرادیان چگالی، پارامتر نسبیته و کنترل نرخ رشد ناپایداری، موقعیت نهشت انرژی باریکه الکترونی نسبیته را می‌توان به مرکز سوخت برای اشتعال مناسب منتقل کرد.

مراجع :

1. M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky, W. L. Kruer, S. C. Wilks, J. Woodworth, E. M. Campbell, M. D. Perry, and R. J. Mason, Phys. Plasmas 1, 1626(1994).
2. C. Deutsch, H. Furukawa, K. Mima, M. Murakami, and K. Nishihara, Phys. Rev. Lett. 77, 2483 (1996).
3. S. YU. Gus'Kov, Laser Part. Beams 23, 255-260 (2005).
4. P. Velarde, F. Ogando, S. Eliezer, J.M. Martinez-Val, J.M. Perlado and M. Murakami, Laser Part. Beams, 43-46 (2005).
5. C. Deutsch, Laser Part. Beams 22, 115.(2004).
6. M. Mahdavi and F. Khodadadi Azadboni, Phys. Plasmas 21, 022707 (2014).
7. D. A. Hammer, N. Rostoker, Phys. Fluids 13, 1831 (1970).



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

8. N J Sircombe, R Bingham, M Sherlock, T Mendonc, and P
9. Norreys, Plasma Phys. Control. Fusion 50 065005(2008).
10. M. Abdel Aziz, Physics Letters A 376, 169–178(2012).
11. F. Pegoraro, F. Califano, D. Del Sarto, 28th ICPIG, Prague, Czech
12. Republic, Topic number: 04,330-331(2007).
13. A. Bret and C. Deutsch, Laser and Particle Beams 24, 269–273(2006).
14. Haijun Ren¹, Zhengwei Wu^{1,2}, Jintao Cao¹, Chao Dong¹ and Paul K Chu, Plasma Phys. Control. Fusion 53035012(2011).