

بررسی آشوب‌های مد الکترون گیر افتاده در توکامک توسط مدل جنبشی-چرخشی

رستمی، امیر - علی عسگریان، محمد

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

ریزنایپایداری‌های مد الکترون گیر افتاده یکی از مد‌های اصلی در ایجاد ریزنایپایداری در توکامک می‌باشد. بررسی و شبیه‌سازی این نوع از ناپایداری توسط مدل جنبشی-چرخشی کمک زیادی در شناخت و پیش‌بینی این نوع از آشوب می‌کند. در این مقاله ساختار فضایی کمیتهای اختلالی پلاسما بررسی می‌گردد؛ همچنین بر اساس شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد که جریان‌های موضعی تاثیر چندانی در این مد از ریزنایپایداری‌ها ندارند. تاثیر پارامترهای پلاسما بر این نوع آشوب بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: ریزنایپایداری، آشوب، مد الکترون گیر افتاده، مدل جنبشی-چرخشی

مقدمه:

مد الکترون گیر افتاده^۱ (TEM) اصلی‌ترین عامل ایجاد ترابرد دمایی الکترون در پلاسماهای گداخت است [۱]. TEM ناشی از الکترونهاي گیر افتاده در قسمت بیرونی توکامک و ناشی از شیب فشار است. مد شیب دمایی یون^۲ (ITG) و مد الکترون گیر افتاده تنها ناپایداریهای خطی هستند که با هم در ابعاد شعاع لارمور اتفاق می‌افتند. پارامترهای کلیدی در بررسی این ناپایداری‌ها شیب چگالی زمینه و شیب دمایی یون و الکترون است. علاوه بر شیب چگالی، TEM ناشی از شیب دمایی الکترون و ITG ناشی از شیب دمایی یون است. برای بررسی یک ناپایداری TEM خالص معمولاً شیب دمایی یون برابر صفر قرار داده می‌شود. در واقع چنین شرایطی در واقعیت و به صورت تجربی بسیار اتفاق می‌افتد [۲-۳] که در تخلیه الکتریک توکامک دمایی الکترون قالب باشد در حالیکه یون هنوز نسبتاً سرد است. در این حالت ITG به صورت خطی پایدار و TEM ناپایدار است.

^۱ Trapped Electron Mode

^۲ Ion Temperature Gradient

روش کار:

مدل جنبشی-چرخشی:

شبهه‌سازی این ناپایداری‌ها بر پایه کد و لاسوف جنبشی-چرخشی GENE است. این کد معادلات غیرخطی جنبشی-چرخشی را در یک شبکه ثابت در فضای فاز پنج بعدی حل می‌کند [۴-۵].

تابع توزیع F_j را به یک قسمت تعادلی F_{j0} و یک قسمت اختلالی F_{j1} تقسیم می‌کنیم؛ در این حالت معادله و لاسوف جنبشی-چرخشی به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial g_j}{\partial t} + \left[\omega_n + \omega_{Tj} \left(v_{||}^2 + \mu \hat{B} - \frac{3}{2} \right) \right] F_{j0} \frac{\partial \chi_j}{\partial y} + \left(\frac{\partial \chi_j}{\partial x} \frac{\partial G_j}{\partial y} - \frac{\partial \chi_j}{\partial y} \frac{\partial G_j}{\partial x} \right) + \frac{2v_{||}^2 + \mu \hat{B}}{2\sigma_j \hat{B}} \left(\mathcal{K}_x \frac{\partial G_j}{\partial x} + \mathcal{K}_y \frac{\partial G_j}{\partial y} \right) + \alpha_j v_{||} \frac{\partial G_j}{\partial y} - \frac{\alpha_j}{2} \mu \hat{B}^2 \epsilon_t \sin z \frac{\partial F_{j1}}{\partial v_{||}} n = 0 \quad (1)$$

که پارامترهای آن به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathcal{K}_x = -2 \frac{L_{\perp}}{R_0} \sin z, \quad \mathcal{K}_y = -2 \frac{L_{\perp}}{R_0} (\cos z + \hat{s}_z \sin z)$$

$$g_j = F_{j1} + \sigma_j \alpha_j v_{||} F_{j0} \hat{\epsilon} \beta_e \bar{A}_{1||}, \quad G_j = g_j + \sigma_j \chi_j F_{j0}$$

$$\mathcal{K}_x = -2 \frac{L_{\perp}}{R_0} \sin z, \quad \mathcal{K}_y = -2 \frac{L_{\perp}}{R_0} (\cos z + \hat{s}_z \sin z)$$

$$\chi_j = \bar{\Phi}_1 + \sigma_j v_{||} \hat{\epsilon} \beta_e \bar{A}_{1||}$$

$$\sigma_j = \frac{e_j T_{e0}}{e T_{j0}}, \quad \alpha_j = \frac{v_{Tj} L_{\perp}}{c_s qR}, \quad \hat{\epsilon} = \left(\frac{qR}{L_{\perp}} \right)^2$$

$$\beta_e = \frac{4\pi n_0 T_{e0}}{B_{ref}^2}$$

$$\omega_n = -\frac{L_{\perp}}{n_0} \frac{dn_0}{dx}, \quad \omega_{Tj} = -\frac{L_{\perp}}{T_{j0}} \frac{dT_{j0}}{dx}$$

تابع توزیع تعادلی به صورت یک تابع توزیع ماکسولوی نوشته می‌شود:

$$F_{j0}(v_{||}, \mu) = \pi^{-3/2} e^{-(v_{||}^2 + \mu \hat{B})} \quad (2)$$

این دستگاه معادلات توسط کد GENE حل می‌شود [۶]. ترابرد الکترواستاتیک ذرات و گرما در راستای

عمود بر سطوح شارش به ترتیب متناسب است با

$$\Gamma = \langle \int F_{j1} v'_{E,x} d^3 v \rangle \quad (3)$$

$$Q_j = \langle \int (v_{||}^2 + \mu \hat{B}) F_{j1} v'_{E,x} d^3 v \rangle \quad (4)$$

که در آن v'_E سرعت سوق $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ است.

پارامترهای عددی و فیزیکی:

پارامترهای فیزیکی در جدول شماره ۱ و پارامترهای عددی در جدول شماره ۲ آمده است

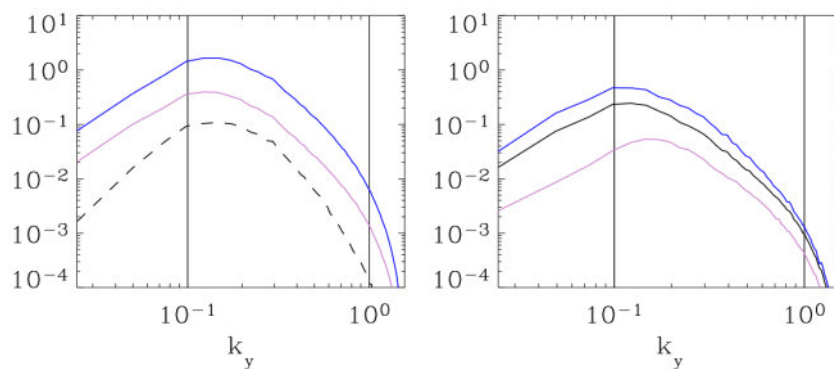
جدول شماره (۱) پارامترهای فیزیکی

ω_n	ω_{T_e}	ω_{T_i}	ϵ_t	q	\hat{s}	T_e/T_i	β_e
3	6	0	0.16	1.4	0.8	3	0.001

جدول شماره (۲) پارامترهای عددی

n_x	n_y	n_z	$n_{v_{ }}$	n_μ	L_x	L_y
128	128	16	40	8	152	256

به دلیل اینکه زمان محاسبات به ریشه دوم کسر جرم یون و الکترون وابسته است به جای استفاده از $\frac{m_i}{m_e} = 1836$ از کسر $\frac{m_i}{m_e} = 400$ استفاده می‌گردد. در شکل ۱ به وضوح مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن این نسبت تغییری در طیف ترابردها ایجاد نمی‌گردد، در حالیکه زمان محاسبات عددی نصف می‌گردد.

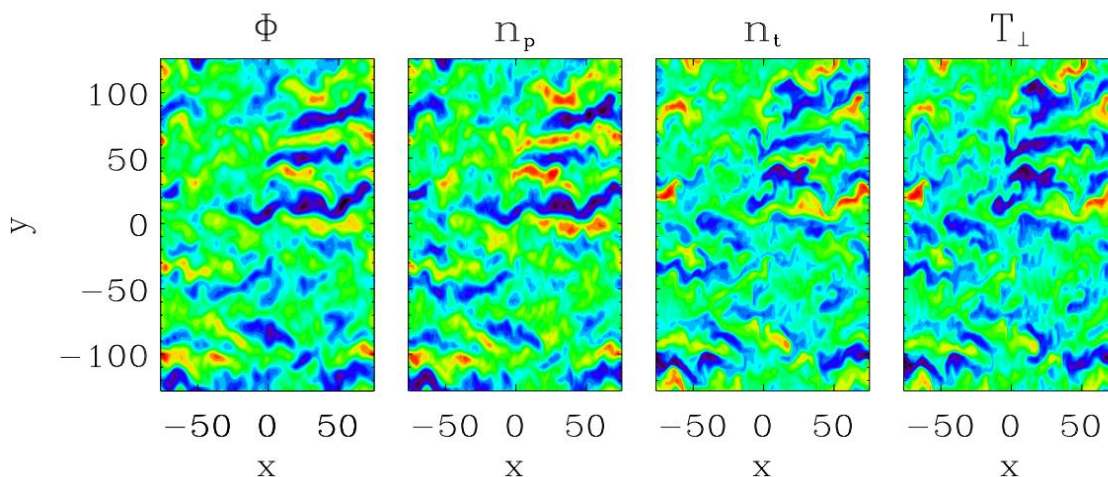


شکل ۱ سمت راست طیف موجی ترابرد حرارتی و سمت چپ ترابرد ذرات می‌باشد.

نتایج:

ساختار فضایی آشوب‌ها:

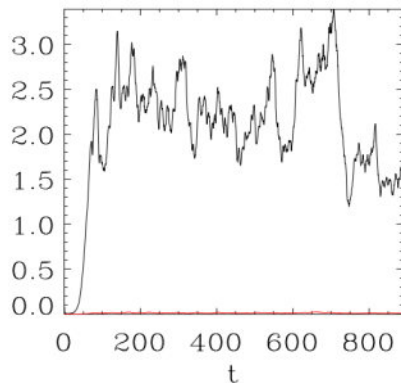
در شکل ۲ یک کانتور از کمیت‌های مختلف پلاسما نمایش داده شده است که در آن جریان‌های اختلالی که در راستای شعاعی کشیده شده اند به وضوح دیده می‌شوند. با کمی دقت در شکل ۴ می‌توان دریافت که ارتباط قوی بین اختلالات پتانسیل الکترواستاتیک و چگالی الکترون‌های عبوری و همچنین بین اختلالات چگالی الکترون گیر افتاده و دمای الکترونی عمود بر میدان مغناطیسی وجود دارد؛ ارتباط اول را می‌توان اینطور توصیف کرد: چون ذرات عبوری آزادانه می‌توانند در راستای میدان مغناطیسی حرکت کنند و به سرعت از اختلالات پتانسیل الکترواستاتیک تبعیت کنند و یا در آن تاثیر بگذارند. ارتباط بین الکترون گیر افتاده و دمای الکترون عمود ناشی از این است که ذرات گیر افتاده دارای سرعت موازی کوچک و سرعت عمود تقریباً بزرگی هستند؛ این مؤلفه سرعت عمود تقریباً بیشترین اثر را در دمای عمود الکترون دارد.



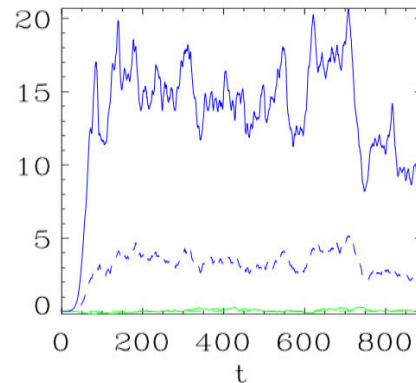
شکل ۲

تاثیر جریان محلی در آشوب:

در مد ITG جریان محلی باعث کاهش آشوب می‌گردد. در این بخش به بررسی تاثیر جریانهای محلی در آشوبهای مد TEM پرداخته خواهد شد و میزان تاثیر آن را در این ناپایداری بررسی می‌گردد. برای این منظور در ابتدای این شبیه سازی جریان محلی صفر قرار داده می‌شود و در زمان $T=600$ جریان محلی به آن اعمال می‌گردد، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است سطر ترابرد در این لحظه افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد و نوسان می‌کند، این تغییرات نوسانی ناشی از حضور ناگهانی جریان محلی است ولی هیچ گونه تغییر شدیدی در میانگین ترابرد به وجود نمی‌آید و واضح است که تاثیر جریان محلی در آشوب TEM بسیار اندک است.



(ب)

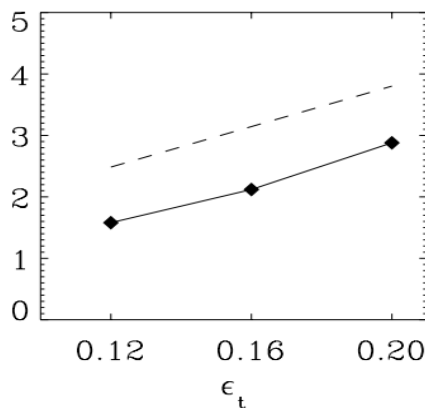


(الف)

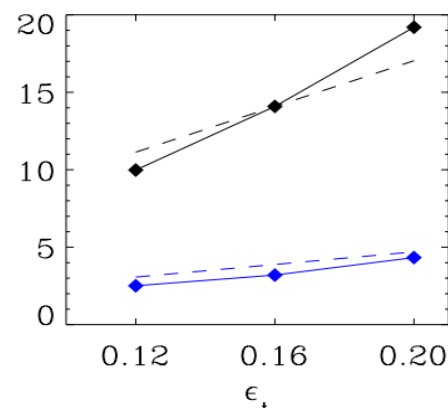
شکل ۳ (الف) ترابرد حرارتی و (ب) ترابرد ذرات.

تأثیر پارامتر عکس نسبت منظر در آشوب‌ها:

پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار می‌گیرد عکس نسبت منظر می‌باشد. شبیه‌سازی متناظر با سه مقدار مختلف این پارامتر در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجا که کسر ذرات گیر افتاده متناسب با معکوس عکس نسبت منظر می‌باشد به نوبه خود افزایش این پارامتر باعث افزایش سطح ترابرد می‌گردد. تغییر در عکس نسبت منظر باعث ایجاد تغییر در کسر ذرات گیر افتاده می‌گردد.



(ب)



(الف)

شکل ۴ (الف) تغییرات ترابرد حرارتی و (ب) تغییرات ترابرد ذرات در سه مقدار عکس نسبت منظر

بحث و نتیجه گیری:

به طور خلاصه در این مقاله، آشوب‌های TEM بی‌برخورد توسط مدل جنبشی-چرخشی بررسی شد. شباهت-ها بین ساختار فضایی آشوب‌ها و تأثیر اندک جریان موضعی در آن را بررسی کردیم و همچنین وابستگی سطح ترابرد به عکس نسبت منظر نشان داده شد. می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف پلاسمای توکامک در

ترابرد ذرات و دما را توسط مدل جنبشی-چرخشی شبیه سازی کرد. آشوب‌ها در توکامک دارای پیچیدگی-های بسیاری هستند اما با بررسی پدیده‌های خطی و غیرخطی در پدیده آشوب توسط مدل جنبشی-چرخشی می‌تواند دیدگاهی تازه به ما در شناخت و پیش‌بینی این ناپایداری‌ها بدهد.

مراجع

- [1] P. C. Liewer, Measurements of microturbulence in tokamaks and comparisons with theories of turbulence and anomalous transport, Nucl. Fusion 25, 543, 1985.
- [2] F. Ryter, F. Leuterer, G. Pereverzev, H.-U. Fahrbach, J. Stober, W. Suttrop, and ASDEX Upgrade Team, Experimental Evidence for Gradient Length-Driven Electron Transport in Tokamaks, Phys. Rev. Lett. 86, 2325, 2001.
- [3] F. Ryter, G. Tardini, F. D. Luca, H.-U. Fahrbach, F. Imbeaux, A. Jacchia, K. K. Kirov, F. Leuterer, P. Mantica, A. G. Peeterset, Electron heat transport in ASDEX Upgrade: experiment and modelling, Nucl. Fusion 43, 1396, 2003.
- [4] T. S. Hahm, Nonlinear gyrokinetic equations for tokamak microturbulence, Phys. Fluids 31, 2670, 1988.
- [5] A. Brizard, Gyrokinetic energy conservation and Poisson-Bracket formulation, Fluids. Phys. B1, 1381, 1989.
- [6] F. Jenko, W. Dorland, M. Kotschenreuther, and B. N. Rogers, Electron temperature gradient driven turbulence, Phys. Plasmas 7, 1904, 2000.