

اثرات برخوردی در ناپایداری رشته ای شدن پلاسمای حامل جریان چگال

محمد رضا تقدسی^{۱*}

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون، کد پستی ۷۳۱۷۵-۴۵۷

* آدرس رایانامه نویسنده مسئول: mtagahdosi@kazerunsfu.ac.ir

کلید واژه: اثرات کوانتومی، پلاسمای حامل جریان، ناپایداری رشته ای شدن.

چکیده

در این پژوهش رفتار پلاسمای حامل جریان چگال در ناپایداری رشته ای شدن بر اساس روابط حاکم بر تغییرات فضایی-زمانی میدان های الکتریکی و مغناطیسی شبیه سازی شده و اثرات برخوردی در سرعت تشکیل رشته ها و فرآیند درهم روندگی آنها پس از اشباع مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به روند تشکیل رشته ها، اشباع آنها و فاز به هم پیوستن آنها، مشاهده می شود اثرات برخوردی سرعت تشکیل رشته ها را کند کرده و زمان رسیدن به فاز اشباع و نیز رسیدن به فاز به هم پیوستن رشته ها را به تاخیر می اندازد اما نهایتا درهم روندگی رشته ها را تسریع می کند.

Collision effects on filamentation instability of a quantum current-carrying plasma

Mohammadreza Taghdosi¹

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Salman Farsi University of kazerun 73175-457, Kazerun, Iran

*E-mail: mtagahdosi@kazerunsfu.ac.ir

Abstract

In the present research, we studied the filamentation instability of a quantum current-carrying plasma to find out how the collisions affect the instability process. For this purpose, we simulated the instability progression based on the associated spatiotemporal equations of electric and magnetic fields produced by filaments. As a result, it is shown that the collision effects slow down the formation phase of filaments and delay the saturation phase of instability. It also prevents the filament merging process from triggering for a while but finally accelerates it.

Keywords: Collision effects, current-carrying plasma, filamentation instability

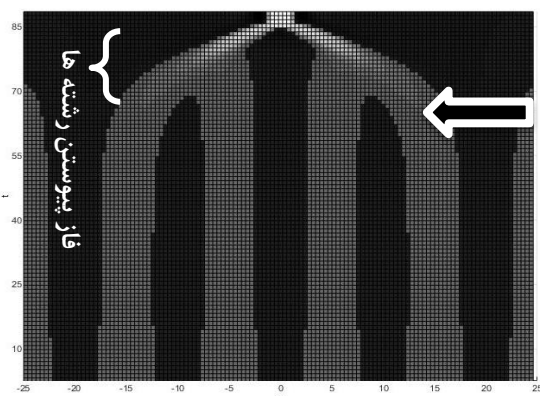
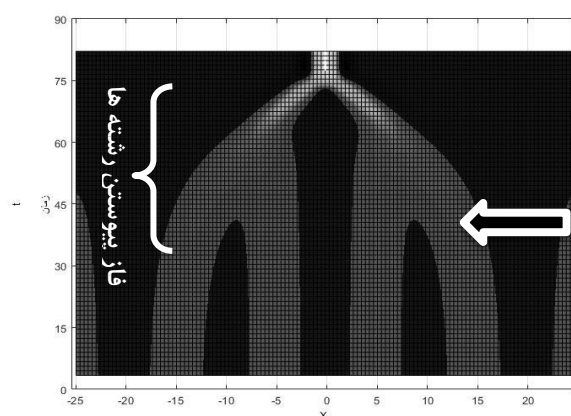
مقدمه

درک بهتر ساز و کار ابر میدان های الکترومغناطیسی در جهان کمک خواهد کرد.

یکی از رایج ترین ناپایداری ها در پلاسمای حامل جریان ناپایداری رشته ای شدن است. این ناپایداری پیشتر در مقالات متعددی هم از نظریه هیدرودینامیکی و هم از نظریه جنبشی مورد مطالعه قرار گرفته اند. [۴-۱] در این مقاله اثرات برخوردی را در سرعت پیشرفت این ناپایداری برای پلاسمای حامل جریان چگال مطالعه خواهیم کرد که مساله بدون برخورد برای آن در چند مقاله بررسی و روابط مربوطه به دست آمده اند. [۵و۶]

سیستم های پلاسمای حامل جریان از آن نظر قابل توجه اند که انرژی جنبشی ناشی از جریان مولفه های آنها می تواند به انرژی الکترومغناطیسی یا حرارتی تبدیل شده و به عنوان منبع انرژی در محدوده مشخصی از فضا به کار گرفته شود. به علاوه بسیاری از محیط های بین ستاره ای و پدیده های اخترفیزیکی شامل پلاسمای حامل جریان هستند که مطالعه چنین سیستم هایی به

روش مورد استفاده در به دست آوردن جواب تحلیلی مساله ارائه می شود و در بخش آخر با مقایسه نتایج شبیه سازی شده برای حالت های برخوردی و غیربرخوردی تاثیر برخورد را در سه فاز تشکیل رشته ها، رسیدن به اشباع، و به هم پیوستن رشته ها بررسی و تحلیل می نماییم.



شکل ۱. مقایسه اثر برخورد در فرآیند درهم رندگی رشته ها به عنوان سومین مرحله اصلی ناپایداری رشته ای شدن در پلاسمای حامل جریان، (الف) بدون اثرات برخوردی، (ب) تحت تاثیر برخوردهای الکترونی (نشان روی شکل شروع مرحله به هم پیوستن رشته ها را نشان می دهد).

حل عددی به روش شبه تحلیلی آدومین ADM

روش تجزیه ADM یکی از کاربردی ترین رهیافتهای ریاضی در حل معادلات دیفرانسیلی غیرخطی است. [V] با به کارگیری این روش در حل معادله فضا زمانی میدانهای الکتریکی و

رشته ای شدن پلاسمای حامل جریان کوانتومی

در این پژوهش، معادلات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی حاکم در مدل هیدرودینامیک کوانتومی و در تقریب پخشی با اضافه کردن اثرات برخوردی بازنویسی شده است. این معادلات به همراه قانون آمپر از مجموعه معادلات ماکسول عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x} (n(x, t) \cdot v(x, t)), \quad (1)$$

$$E_x(x, t) = \frac{T_i}{en(x, t)} \frac{\partial}{\partial x} n(x, t) + \frac{1}{e} M v_i v_i(x, t) \quad (2)$$

$$E_x(x, t) = \frac{-T_{Fe}}{en(x, t)} \frac{\partial}{\partial x} n(x, t) - \frac{v_0 B_z(x, t)}{c} - m v_e v_e + \frac{\hbar^2}{2em} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \sqrt{n(x, t)}}{\partial x^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} B_z(x, t) = \frac{4\pi e v_0}{c} (n(x, t) - n_0). \quad (4)$$

با در نظر گرفتن اختلال دوره ای چگالی مولفه های پلاسما و در نتیجه تغییرات مشابهی برای میدان های الکتریکی و مغناطیسی، سپس خطی سازی و ترکیب این روابط شکل توزیع چگالی مولفه های پلاسما به صورت تابعی از مکان و زمان به دست خواهد آمد که چگونگی آغاز و رشد ناپایداری رشته ای شدن و چگونگی پیشرفت آن را برای ما مشخص خواهد کرد. پس از محاسبات بسیار طولانی اما نسبتاً سراسر جبری، نهایتاً می توان به یک معادله دیفرانسیلی جزئی غیرخطی برای تحول فضایی-زمانی میدان مغناطیسی رسید که به طور ضمنی دینامیک ناپایداری رشته ای شدن را در پلاسمای حامل جریان کوانتومی توصیف می کند. در اینجا از آوردن روابط و محاسبات اجتناب نموده ایم اما نتیجه شبیه سازی این فرآیند برای دو حالت بدون برخورد و برخوردی در فاز اشباع و فاز به هم پیوستن رشته ها در شکل ۱ آمده است. در بخش بعدی توضیحاتی در رابطه

که در آن $b = 1 - c^2 - Rc^4$ است. با جایگزینی این تابع در رابطه بازگشتی معرفی شده می‌توان جملات دیگر سری را نیز به دست آورد و نهایتاً بر اساس سری به دست آمده توزیع چگالی پلاسما را در فضا و زمان شبیه سازی کرد. (شکل ۱)

بحث و نتیجه گیری

چنان که می‌دانیم و از نتیجه شبیه سازی پیداست ناپایداری رشته ای شدن خود شامل سه مرحله کاملاً مشخص است:

(۱) تشکیل رشته‌های جریان،

(۲) رشد رشته‌های جریان تا رسیدن به مرحله اشباع،

(۳) به هم پیوستن رشته‌های جریان و تشکیل یک رشته واحد از جریان.

در واقع ناپایداری رشته ای شدن با کوچکترین اختلال در توزیع جریان پلاسما آغاز می‌شود. این غیریکنواختی در توزیع چگالی به تدریج با زمان رشد کرده و میدان‌های مغناطیسی اختلالی اولیه را ایجاد خواهد کرد. این میدان نیز به نوبه خود نیروی جاذبه‌ای را سبب خواهد شد که برآیند آن به سمت مرکز نواحی چگال‌تر است. این نیرو پلاسماهای مجاور را تحت تاثیر قرار داده و رشته‌های اولیه جریان را تشکیل می‌دهد. همچنین با گذشت زمان این نیروها به واسطه اثر تنگش موجب متراکم‌تر شدن رشته‌ها می‌گردند. از طرفی با متراکم‌تر شدن رشته‌ها میدان مغناطیسی ناشی از آنها نیز قوی‌تر شده و به همین ترتیب رفته رفته ذرات بیشتری جذب رشته‌های جریان می‌شوند. میدان مغناطیسی حلقوی شکل اطراف هر رشته جریان به نوبه خود عاملی برای جذب میکرورشته‌های مجاور است. با تلفیق رشته‌ها و ایجاد رشته‌های چگال‌تر میدان نیز قویتر و قویتر می‌شود. رشد رشته‌ها همچنان ادامه خواهد یافت تا جایی که سیستم به اشباع برسد. در این مرحله نمایه‌های چگالی و میدان مغناطیسی دیگر با زمان تغییری نخواهند کرد. بدین معنی که فشردگی بیشتر

مغناطیسی یا معادله دیفرانسیل مربوط به توزیع چگالی پلاسما در زمان، این معادله به صورت یک معادله عمومی نوشته می‌شود که جوابهای آن به صورت یک سری به سرعت همگراشونده بیان خواهند شد. شکل عمومی معادله به صورت زیر است،

$$u_t = L(u) + N(f(u)), \quad (5)$$

که L و N عملگرهای خطی و غیرخطی‌اند. به کمک روابط بازگشتی زیر می‌توان جوابی به صورت سری برای مساله یافت.

$$u_0(x, t) = u(x, 0) \quad (6)$$

$$u_{n+1}(x, t) = \int_0^t L(u_n) dt + \int_0^t A_n dt, \quad n \geq 0 \quad (7)$$

که در آن چند جمله ای های A_n به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$A_n = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dt^n} [N(\sum \lambda^i u_i)], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

بدین ترتیب می‌توان جواب سری معادله را به صورت زیر نوشت:

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t) \quad (9)$$

به‌منظور ارضای شرایط مرزی لازم است که یک تابع اولیه اختلالی به صورت یک تابع فرد با رفتار سینوسی در نظر گرفته شود تا مقدار تابع را روی مرزها صفر کند و نیز به دلیل تقارن فضایی موجود در مسئله برای مرکز سیستم مقدار صفر را نتیجه دهد. همچنین با توجه به شرایط استفاده از روش ADM لازم است که تابع پیشنهادی در بخش خطی معادله نیز صدق کند. تابع استفاده شده در این مساله که شرایط فوق الذکر را نیز برآورده می‌کند به صورت زیر است،

$$B_0(x, t) = ae^{bt} \sin(cx) \quad (10)$$

فرایند به هم پیوستن رشته ها با افزایش فرکانس برخورد کندتر می شود زیرا برخورد یونها با ذرات خنثی باعث می شود آنها نتوانند به خوبی الکترونها را دنبال کنند که این خود منجر به کاهش سرعت الکترونها می شود. همچنین افزایش دما می تواند با افزایش تحرک یونها و تضعیف سریعتر میدان بار فضا فرایند جمع شدگی رشته ها را سرعت بخشد.

مرجع ها

- [1] Hao, B., Sheng, Z. M., Ren C., Zhang, J., (2009). Relativistic collisional current-filamentation instability and two-stream instability in dense plasma, *Phys. Rev. E* 79, 046409.
- [2] Ebrahimi, F., (2017). Nonlinear reconnecting edge localized modes in current-carrying plasmas, *Phys. Plasmas* 24, 056119.
- [3] Hao, B., Sheng, Z. M., Zhang, J., (2008). Kinetic theory on the current-filamentation instability in collisional plasmas, *Phys. Plasmas*, 15, 082112.
- [4] Hajisharifi, K., Tajik-Nezhad, S., Mehdian H., (2019). Fluid description of collisional current filamentation instability of a weakly ionized plasma in the presence of magnetic field, *Iranian J. Phys.*, 19.1 157-166.
- [5] Niknam, A.R., Taghadosi, M.R., Majedi, S., Khorashadizadeh, S. M. (2013) Formation of current filaments and magnetic field generation in a quantum current-carrying plasma, *Phys. Plasmas*, 20, 092310.
- [6] Khorashadizadeh, S. M. Taghadosi, M. R. and Niknam, A. R. (2014). Filamentation Instability in a Current-Carrying Plasma in the Presence of Quantum Effects, *Contrib. Plasma Phys.*, 1-6.
- [7] Adomian G., Rach, R. (1985). *J. Math. Anal. Appl.* 112, 497.

رشته ها امکان پذیر نخواهد بود و بنابراین قدرت میدان مغناطیسی به بیشینه مقدار خود خواهد رسید. این مرحله ناشی از موازنه بین نیروی تنگش مغناطیسی، نیروی الکتروستاتیکی افزایشی ناشی از جدایی بارها و نیروی گرادیان فشار جنبشی است. علی رغم آنکه میدان مغناطیسی سعی بر متراکم کردن رشته های جریان دارد اما نیروی ناشی از گرادیان فشار جنبشی از تراکم بیشتر رشته جریان جلوگیری می کند. از طرف دیگر در تشکیل رشته های جریان به دلیل لختی کمتر، الکترون ها سریعتر عمل کرده و می توان گفت که اصطلاحاً یونها را جا می گذارند. اگر چه یونها به دنبال الکترون ها کشیده می شوند اما جابه جایی سریعتر الکترون ها نسبت به یونها به دلیل لختی کمتر موجب می شود که در این فرایند میدان الکتروستاتیکی ای ناشی از جدایی بارها ایجاد شده و به مرور زمان رشد کند و نهایتاً همین نیرو عاملی در رسیدن سیستم به اشباع خواهد شد. با این حال مرحله اشباع آخرین مرحله در ناپایداری رشته ای شدن نخواهد بود و پس از این مرحله ناپایداری وارد فاز دیگری می شود که همان به هم پیوستن رشته هاست. چنانکه گفته شد سیستم به دلیل موازنه نیروهای ناشی از میدان مغناطیسی و گرادیان فشار و میدان بار فضا برای مدت محدودی اشباع می شود. اما با حرکت تدریجی یونها در فرایند پخش دوقطبی که به دلیل لختی بیشتر نسبت به الکترون ها حرکت آنها خیلی کندتر است، میدان بار فضا رفته رفته تضعیف شده و از طرفی به دلیل تاثیر نیروهای جاذبه بین رشته جریان های مجاور، این رشته ها به یکدیگر نزدیک شده و به هم می پیوندند. در نتیجه در این مرحله دامنه میدان مغناطیسی و نمایه چگالی پلاسمایی رشد بسیار سریعی خواهند داشت، اما همان گونه که از شکل ۱ پیداست برخوردها موجب شده اند که فرایند به هم پیوستن رشته ها قدری به تعویق افتد و در عوض پس از شروع با سرعت بیشتری ادامه یابد. در واقع