

مدل سازی حرکت یونها و رفتار بار-فضای مثبت در پلاسمای مغناطیسی گرم و برخوردی

محمد محسن، حاتمی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک

چکیده:

در این مقاله، با در نظر گرفتن پلازما به عنوان یک سیال گرم و برخوردی و با استفاده از معادلات هیدرودینامیکی به ارابه مدلی سیالی برای توصیف پلاسماهای مغناطیسی گرم و برخوردی پرداخته می شود. نتایج عددی حاصل از این مدل برای یک پلاسمای شبه خنثای یون-الکترون نشان می دهد که مسیر حرکت یونها در لایه مرزی پلازما تابعی از دما و فشار یونی است و با افزایش هر یک از این دو عامل، سرعت ذرات در ناحیه غلاف کاهش می یابد. همچنین نتایج حاصل نشان می دهد که اندازه و موقعیت بار-فضای تشکیل شده در ناحیه غلاف تابعی از دمای یونها، شدت و راستای میدان مغناطیسی است.

کلمات کلیدی: پلاسمای مغناطیده، بار-فضا، شعاع لارمور، معادلات سیالی.

مقدمه :

اثر میدان مغناطیسی ثابت بر ذرات باردار متحرک از موضوعات قدیمی و شناخته شده در فیزیک پلاسماست. یکی از کاربردهای این ایده ی شناخته شده، تهیه باریکه هایی پر انرژی از ذرات باردار است که در زمینه های مختلفی از جمله درمان بیماران سرطانی کاربرد دارد [۱]. در این میان نکته قابل اهمیت اطلاع از تاثیر پارامترهای پلازما مانند دما و فشار بر نحوه تغییر رفتار ذرات باردار پلازما در میدان مغناطیسی و بار-فضای ناحیه غلاف است. در گذشته تاثیر برخی مشخصات پلازما مانند بزرگی و زاویه میدان مغناطیسی، حضور یونها یک بار یونیزه گاز کمکی و حضور یونها دو بار یونیزه شده بر رفتار ذرات در میدان مغناطیسی خارجی مطالعه شده است [۲،۳]. همچنین تاثیر عوامل مختلفی بر ویژگی های بار-فضای ناحیه کاتدی پلازما بررسی شده است [۴،۵]. در بیشتر تحقیقات فوق الذکر پلاسمای مورد مطالعه سرد و غیربرخوردی فرض شده است. ضمناً قدرت میدان مغناطیسی کمتر از یک تسلا فرض شده است. به عبارت بهتر این مطالعات و نتایج آنها بیشتر مربوط به پلاسماهای آزمایشگاهی است. در سال ۲۰۱۳ اثر میدان مغناطیسی قوی بر یک پلاسمای دو یونی بررسی گردید اما در آنجا نیز پلاسمای مذکور سرد و غیر برخوردی در نظر گرفته شد [۶]. در این مقاله می خواهیم ضمن تعمیم مدل ارابه شده در منبع [۶] به یک پلاسمای قوی مغناطیده ی گرم و برخوردی، تاثیر همزمان دما و فشار یونی بر مسیر حرکت یونها و نیز تاثیر میدان مغناطیسی بر رفتار بار-فضای تشکیل شده در ناحیه غلاف این پلازما را شبیه سازی نماییم. برای این منظور از یک مدل سیالی برای توصیف پلازما استفاده می کنیم. نتایج حاصل از حل عددی معادله های اصلی این مدل نشان می دهد افزایش دما و فشار یونی باعث

کاهش شعاع لارمور یونها (شعاع چرخش یونها حول راستای میدان مغناطیسی اعمال شده) می گردد. همچنین ملاحظه می شود با افزایش نیروی مغناطیسی و دمای یونی محل تجمع بیشینه ی بار-فضای تشکیل شده در ناحیه غلاف به ترتیب به طرف دیواره (کاتد) و لبه غلاف جابجا می شود.

روش کار :

در این بخش به بررسی مدل استفاده شده برای بررسی مورد نظر پرداخته می شود. ابتدا فرض می شود پلاسما ضعیف یونیزه و شامل یونهای مثبت و الکترون باشد و مطابق با شکل (۱) ناحیه $x < 0$ را اشغال کرده باشد. غلاف پلاسمایی یعنی ناحیه ای که مملو از یونهای مثبت است در ناحیه $x > 0$ تشکیل شده است. همچنین فرض می شود در راستای θ یک میدان مغناطیسی ثابت با بزرگی B_0 به پلاسمای مورد مطالعه اعمال شود یعنی $\vec{B}_0 = (B_0 \cos \theta, 0, B_0 \sin \theta)$ (شکل (۱)). با توجه به اینکه یونهای مثبت موجود در پلاسما، گرم و برخوردی در نظر گرفته شده اند معادلات هیدرودینامیکی توصیف کننده پلاسما را می توان به شکل زیر نوشت [۱]:
معادله پیوستگی یونها:

$$\nabla \cdot (n_i \vec{V}_i) = Z_i n_e, \quad (1)$$

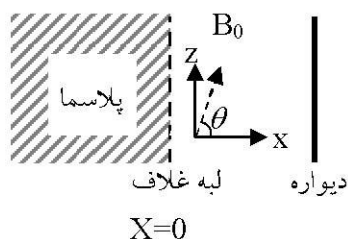
معادله حرکت یونها:

$$m_i \vec{V}_i \cdot \nabla \vec{V}_i = -e(\nabla \phi - \vec{V}_i \times \vec{B}_0) - \frac{1}{n_i} \nabla p_i - m_i v_{i0} \vec{V}_i, \quad (2)$$

و معادله پواسون:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

که Z_i ، $p_i = n_i k_B T_i$ ، فرکانس یونیزاسیون، k_B ثابت بولتزمن، v_{i0} فرکانس برخورد یون-خشی و \vec{V}_i ، m_i ، n_i و T_i به ترتیب سرعت، جرم، چگالی و دمای یونهای مثبت هستند.



شکل (۱). نمای کلی پلاسمای در نظر گرفته شده.

در این مدل ناحیه غلاف یک بعدی در نظر گرفته شده و فرض می شود که تمام پارامترها فقط در راستای x (عمود بر دیواره) تغییر کنند. ضمناً الکترونها در حالت تعادل در نظر گرفته می شوند [۶-۲]؛ بنابراین توزیع چگالی آنها از رابطه بولتزمن پیروی می کند:

$$n_e = n_{0e} \exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right), \quad (4)$$

که T_e و n_{0e} به ترتیب دما و چگالی اولیه الکترونی هستند. معادلات (۳)-(۱) معادلات اصلی مدل استفاده شده برای شبیه سازی رفتار بار-فضا و حرکت یونها در یک پلاسمای مغناطیسی، گرم و برخوردی هستند. شکل بهنجار شده این معادلات که برای محاسبات عددی مناسب تر است به صورت زیر است:

$$\frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{N_i}{(w_{ix}^2 - T_{ie})} \left[\frac{\partial \psi}{\partial \xi} - \delta w_{iy} \sin \theta + \frac{w_{ix} v_i}{\omega_{pi}} \left(1 + \frac{\sigma N_e}{N_i} \right) \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_{ix}}{\partial \xi} = -\frac{w_{ix}}{(w_{ix}^2 - T_{ie})} \left[\frac{\partial \psi}{\partial \xi} - \delta w_{iy} \sin \theta + \frac{w_{ix} v_i}{\omega_{pi}} \left(1 + \frac{\sigma N_e T_{ie}}{N_i w_{ix}^2} \right) \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial w_{iy}}{\partial \xi} = \delta \left(\frac{w_{iz} \cos \theta}{w_{ix}} - \sin \theta \right) - \frac{w_{iy} v_i}{w_{ix} \omega_{pi}}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial w_{iz}}{\partial \xi} = -\delta \frac{w_{iy} \cos \theta}{w_{ix}} - \frac{w_{iz} v_i}{w_{ix} \omega_{pi}}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} = N_e - N_i, \quad (9)$$

که $\vec{w}_i = \vec{V}_i / c_S$ ، $\xi = x / \lambda_{De}$ ، $\delta = \omega_{ci} / \omega_{pi}$ ، $N_i = n_i / n_0$ ، $T_{ie} = T_i / T_e$ ، $\sigma = Z_i / v_i$ ، $\psi = e\phi / T_e$ که $\omega_{pi} = (n_0 e^2 / \epsilon_0 m_i)^{1/2}$ ، طول دمای الکترونی، $\lambda_{De} = (\epsilon_0 T_e / n_0 e^2)^{1/2}$ ، $N_e = n_e / n_0 = \exp(\psi)$ ، یونی پلازما و $\omega_{ci} = (eB_0 / m_i)$ فرکانس سیکلوترونی یونهاست.

همچنین با توجه به تعریف N_e و N_i می توان چگالی بار-فضا در ناحیه کاتدی پلازما را به شکل زیر تعریف کرد:

$$N_{sp} = N_e - N_i. \quad (10)$$

برای حل عددی معادلات جفت شده (۹)-(۵) از روش Runge-Kutta مرتبه چهار با شرایط زیر استفاده شده است:

$$B_0 = 1 - 5T, \quad Z_i = v_i, \quad \theta = 30^\circ, \quad n_0 = 10^{19} m^{-3}, \quad N_{i0} = N_{e0} = 1, \quad \vec{w}_{0i} = (1.2, 0.08, 0)$$

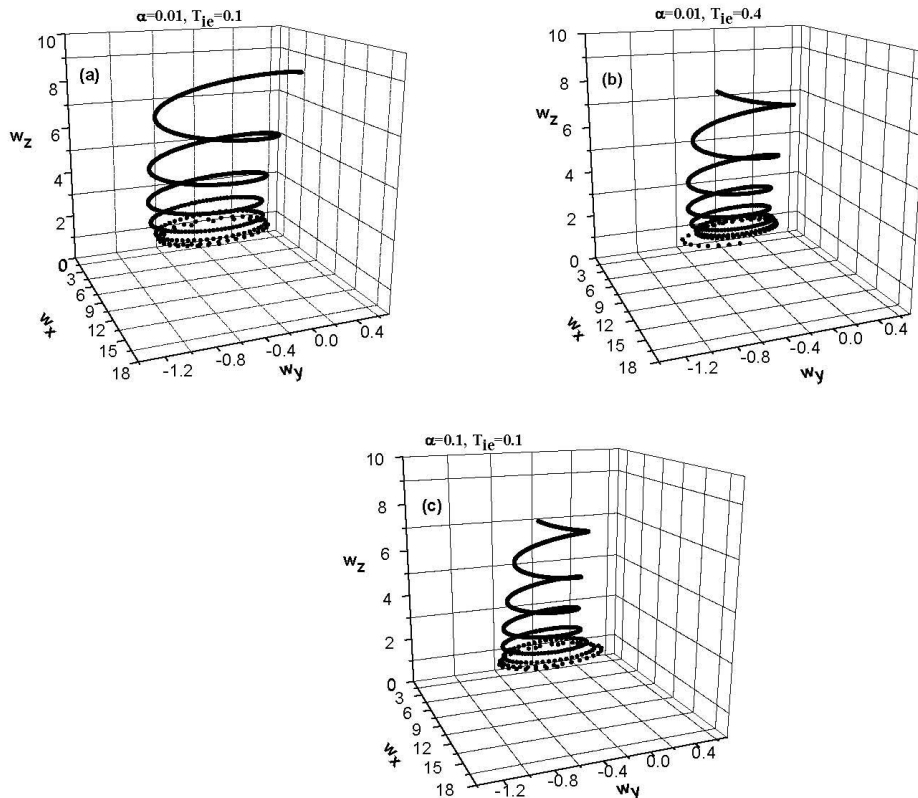
و $\psi(\xi=0) = 0$ و $(d\psi/d\xi)_{\xi=0} = 0.01$ است.

نتایج:

در شکل (۲) تاثیر دما T_i و فشار یونی $\alpha = \lambda_{De} v_i / w_{iz}$ α کمیته بی بعد معرف بزرگی فرکانس برخورد یونها که خود به فشار بستگی دارد بنابراین برای بررسی اثر فشار بر حرکت یونها کافی است تغییرات حرکت آنها به ازای مقادیر مختلف α بررسی شود) بر مسیر حرکت یونها نشان داده شده است. از مقایسه شکل‌های (۲a) و



(۲b) می توان دید که با افزایش دمای یونی سرعت یونها و شعاع حرکت مارپیچی شان کاهش می یابد و این یونها در شعاع های کوچکتری می چرخند. همچنین مقایسه شکل های (۲a) و (۲c) نشان می دهد که با افزایش فشار یونی (افزایش α) سرعت و نیز شعاع چرخش یونها در پلاسمای مغناطیسی کاهش می یابد.



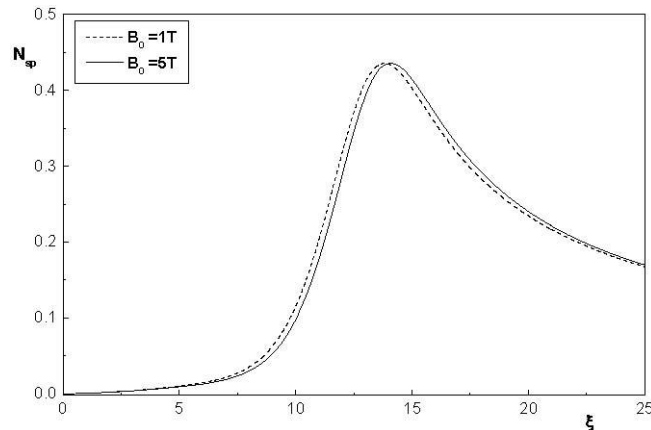
شکل (۲). اثر دما و فشار یونی بر حرکت یونها و شعاع چرخش آنها در فضای سه بعدی سرعت به ازای $B_0 = 3T$ و $\alpha = 0.01, T_i = 0.1T_e$ (a) و $\alpha = 0.01, T_i = 0.4T_e$ (b) و $\alpha = 0.1, T_i = 0.1T_e$ (c).

در شکل (۳) تاثیر شدت میدان مغناطیسی خارجی بر بار-فضای موجود در ناحیه کاتدی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود توزیع بار-فضا در ناحیه کاتدی یکنواخت نیست و در فاصله حدود $13\lambda_{De}$ به بیشترین مقدار خود می رسد. همچنین می توان دید که با افزایش شدت میدان مغناطیسی مکان بیشینه ی بار-فضا از لبه غلاف دورتر می شود ولی مقدار این بیشینه تغییر نمی کند.

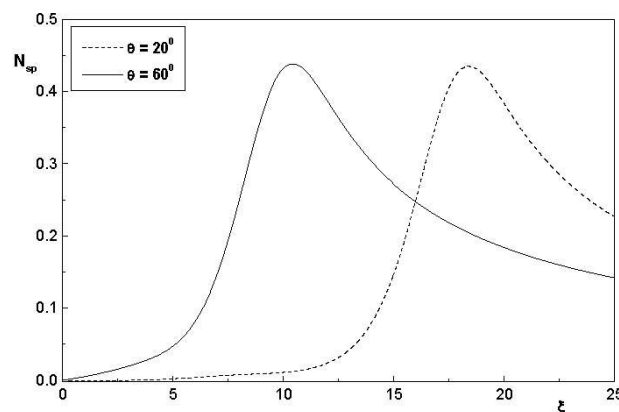
در شکل (۴) تاثیر راستای میدان مغناطیسی اعمال شده بر بار-فضای ناحیه غلاف پلاسمای گرم و مغناطیسی نشان داده شده است. در این حالت نیز توزیع بار-فضا در ناحیه کاتدی نایکنواخت است و هر چه راستای میدان مغناطیسی به راستای عمود بر دیواره نزدیکتر باشد محل بیشینه بار-فضا در فاصله دورتری از لبه غلاف تشکیل خواهد شد.



اثر دمای یونی بر توزیع بار-فضا در ناحیه کاتدی پلاسمای گرم و مغناطیسی در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می شود که با افزایش دمای یونی مقدار بار-فضا به مقدار ناچیزی افزایش می یابد و محل بیشینه ی بار-فضا به طرف لبه غلاف جابجا می گردد.

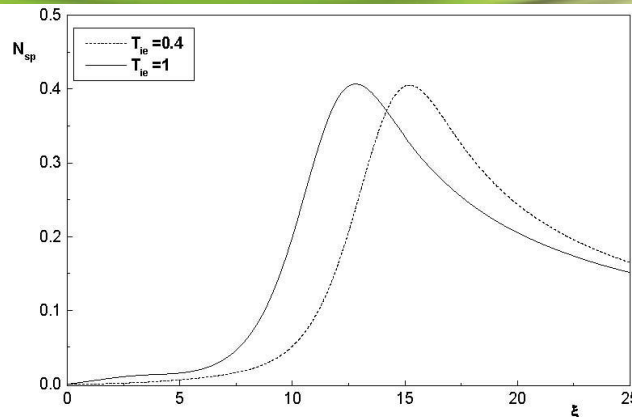


شکل (۳). منحنی تغییرات بار-فضای تشکیل شده در ناحیه کاتدی پلاسمای هیدروژن به ازای $T_{ie} = 1$ ، $\theta = 30^\circ$ ، $n_0 = 10^{19} m^{-3}$ و $\sigma = 1$ و مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی.



شکل (۴). منحنی تغییرات بار-فضای تشکیل شده در ناحیه کاتدی پلاسمای هیدروژن به ازای $T_{ie} = 1$ ، $B_0 = 3T$ ، $n_0 = 10^{19} m^{-3}$ و $\sigma = 1$ و مقادیر مختلف θ .

بحث و نتیجه گیری:



شکل (۵). منحنی تغییرات بار-فضای تشکیل شده در ناحیه کاتدی پلاسمای هیدروژن به ازای $B_0 = 3T$ ، $\theta = 30^\circ$ ، $n_0 = 10^{19} m^{-3}$ و مقادیر مختلف T_{ie} .

در این مقاله مدلی سیالی برای بررسی پلاسماهای شبه خنثای ضعیف یونیزه در حضور میدان مغناطیسی قوی و یونهای گرم و برخوردی (پلاسمای توکامک) ارائه گردید و به عنوان کاربردی از این مدل اثر دما و فشار یونی بر حرکت یونها و رفتار بار-فضای تشکیل شده در غلاف یک چنین پلاسمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد با افزایش دما و فشار یونی مسیر حرکت یونها در ناحیه اطراف کاتد تغییر می کند و یونها در شعاع های کوچکتری در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده شروع به چرخش می کنند. همچنین ملاحظه شد با افزایش شدت میدان مغناطیسی و نیز کاهش زاویه این میدان با راستای عمود بر دیواره، محل بیشینه ی بار-فضا از لبه غلاف دورتر خواهد شد در حالیکه با افزایش دمای یونی محل بیشینه ی مذکور به لبه غلاف نزدیکتر می شود.

مراجع :

- [۱] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and controlled fusion, Plenum, New York, ۱۹۷۴.
- [۲] X. Zou, J-Y. Liu, Y. Gong, Z-X. Wang, Y. Liu, and X-G. Wang, Plasma sheath in a magnetic field, Vacuum ۷۳, ۶۸۱-۶۸۵, ۲۰۰۴.
- [۳] M. M. Hatami, A. R. Niknam, B. Shokri, and H. Ghomi, Magnetized plasma sheath with two species of positive ions, Phys. Plasmas ۱۵, ۰۵۳۵۰۸-۰۵۳۵۱۳, ۲۰۰۸.
- [۴] S.F. Masoudi, The effects of ion-neutral collision frequency on the plasma sheath dynamics for oblique entrance of ions into the sheath, Eur. Phys. J. D ۶۴, ۳۶۹-۳۷۳, ۲۰۱۱.
- [۵] X. Zou, M. Qi, H. Liu, L. Zhang, J. Liu, Y. Gong, The ion density distribution in a magnetized plasma sheath, Vacuum ۸۳, ۲۰۵-۲۰۸, ۲۰۰۹.
- [۶] M. M. Hatami, Simulation of ion cyclotron motion in magnetic field in the presence of double-ionized positive ions, ۱۹th Iranian's Nuclear Conf., Mashhad, ۷۰۸-۷۱۳, ۲۰۱۳.