



بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر شتاب الکترون نسبیتی در کانال یونی ایجاد شده در شتابدهنده‌های پلاسمایی با ابعاد کوچک

کارگریان، آمنه*^(۱) - مهدیان، حسن^(۲)

^(۱) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

^(۲) دانشگاه خوارزمی، دانشکده فیزیک، پژوهشگاه پلاسما

چکیده:

در این مقاله پارامترهای مؤثر بر روی شتاب الکترون نسبیتی در کانال یونی ایجاد شده در شتابدهنده پلاسمایی را بصورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار داده‌ایم. بدین منظور، تأثیرات میدان کانال یونی و یک میدان مغناطیسی ویگلری تخت بر روی شتاب الکترون و دینامیک نسبیتی آن مطالعه شده است. برای حل عددی معادلات به دست آمده، از یک کد تک ذره نسبیتی سه بعدی و روش رانگ-کوتای مرتبه چهار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند بهره انرژی الکترون و دینامیک آن در کانال یونی بطور قابل توجهی تحت تأثیر بار فضایی یون، موج پلاسمایی و ویگلر تخت قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده می‌تواند در طراحی شتابدهنده‌های پلاسمایی حائز اهمیت باشد.

کلمات کلیدی: موج پلاسمایی، کانال یونی لیزری، میدان ویگلری تخت، بار فضایی یون

مقدمه:

در اثر عبور یک پالس لیزری قوی از پلاسما موج پلاسمایی ایجاد می‌شود که با برهم‌کنش این موج با ذرات پلاسما، انرژی موج به ذرات انتقال داده می‌شود. این مکانیسم اساس کار شتابدهنده‌های لیزر-پلاسمایی می‌باشد. در واقع، پالس لیزر با وارد کردن نیروی گرانشی به ذرات پلاسما، باعث ایجاد اختلال در چگالی پلاسما می‌شود. بنابراین یک موج طولی در پلاسما و پشت پالس لیزر برانگیخته می‌شود که موج دنباله نامیده می‌شود و با سرعت فازی برابر سرعت گروه امواج الکترومغناطیسی در پلاسما حرکت می‌کند [۱،۲]. مؤلفه افقی نیروی گرانشی لیزر باعث ایجاد موج پلاسمایی و مؤلفه عرضی آن با راندن الکترون‌ها از مرکز باعث تشکیل یک کانال یونی می‌شود. در شدت‌های نسبیتی لیزر دامنه‌ی میدان طولی ایجاد شده می‌تواند به دامنه‌ی شکست موج برسد. در این دامنه جمعیت قابل توجهی از الکترون‌ها می‌توانند تا انرژی‌های بالا شتاب بگیرند [۳]. در سالهای اخیر، فاکتورهای مؤثر بر روی بهره انرژی الکترون مانند میدان مغناطیسی ثابت زاویه دار [۵] و ثابت محوری [۶] در محیط پلاسما و یا در مکانیسم لیزر الکترون آزاد [۷-۹] بررسی شده‌اند. در این مقاله اثرات همزمان پتانسیل بار فضایی یون، موج پلاسمایی، میدان مغناطیسی ویگلر تخت بر روی شتاب الکترون و

مسیر حرکت آن در کانال یونی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم مقاله، معادلات مربوط به حرکت الکترون نسبیتی در حضور ویگلر تخت، موج پلاسمایی و بار فضایی یون به دست آورده شده‌اند و بخش سوم به تحلیل عددی، بحث و نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

دینامیک الکترون در کانال یونی مغناطیده:

در پلاسمای رقیق، با توجه به چگالی محیط، پس از یونش، چگالی الکترونی بسیار پایین‌تر از چگالی بحرانی می‌باشد. هنگامی که این نوع پلاسما در معرض پالس‌های لیزری قوی قرار می‌گیرد، پلاسمای نسبیتی ایجاد می‌شود. معادلات حاکم بر حرکت الکترون نسبیتی بصورت زیر می‌باشند:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e\mathbf{E} + e\nabla\varphi + \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{B}}{C} \quad (1)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{-e}{m_0 C^2} (\mathbf{E} - \nabla\varphi) \cdot \mathbf{V} \quad (2)$$

که در اینجا، $\mathbf{B} = B \cos(2\pi z / \lambda_\omega) \hat{x}$ میدان ویگلر تخت می‌باشد. پتانسیل بار فضایی یون نیز به صورت $\varphi = \varphi_0 (1 - (x^2 + y^2) / r_0^2)$ در نظر گرفته شده است. میدان الکتریکی موج پلاسما را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۱۰].

$$\mathbf{E} = \hat{x} A \exp(-(x^2 + y^2) / r_p^2) \frac{2x}{kr_p^2} \sin(\omega t - kz + \theta) \quad (3)$$

$$+ \hat{z} A \exp(-(x^2 + y^2) / r_p^2) \cos(\omega t - kz + \theta)$$

در اینجا، r_p شعاع موج پلاسمایی و θ فاز اولیه می‌باشد. با جایگذاری میدان مغناطیسی، بار فضایی یون و میدان الکتریکی موج پلاسمایی در روابط (۱) و (۲) معادلات حاکم بر حرکت الکترون در کانال یونی مغناطیده بدست می‌آیند:

$$\frac{dp_x}{dt} = -eA \exp(-(x^2 + y^2) / r_p^2) \frac{2x}{kr_p^2} \quad (4)$$

$$\sin(\omega t - kz + \theta_0) - e\varphi_0 \frac{2x}{r_0^2}$$

$$\frac{dp_y}{dt} = -e\varphi_0 \frac{2x}{r_0^2} - \frac{eV_z B \omega}{c} \cos(2\pi z / \lambda_\omega) \quad (5)$$

$$\frac{dp_z}{dt} = -eA \exp(-(x^2 + y^2)/r_p^2) \times \cos(\omega t - kz + \theta_0) \quad (6)$$

$$-\frac{eV_y B \omega}{c} \cos(2\pi z / \lambda_{\omega})$$

به منظور تبدیل معادلات تحلیلی بالا به فرم ساده‌تر پارامترهای بدون بعد را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

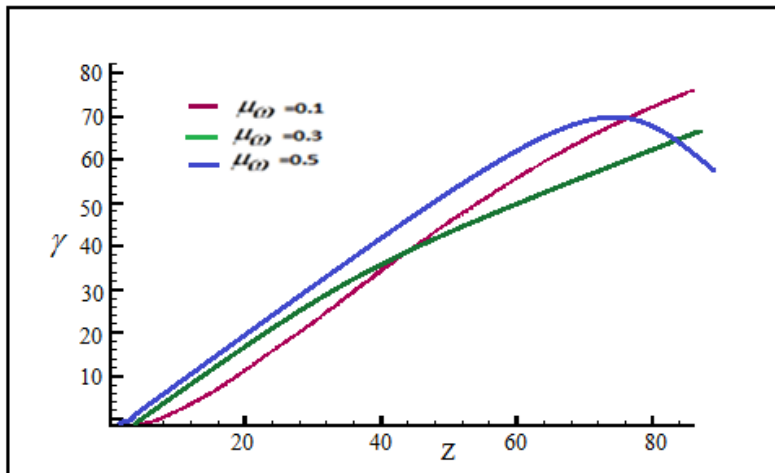
$$t' = \omega t, \quad k' = kc / \omega, \quad a_p = eA / m_0 \omega c, \quad z' = kz, \quad r_1^2 = k^2 r_0^2, \quad r_2^2 = k^2 r_p^2, \quad \varphi'_0 = e \varphi_0 / m_0 c^2, \quad x' = kx$$

$$\mu_{\omega} = eB / m_0 \omega c, \quad \mathbf{p}' = \mathbf{p} / mc$$

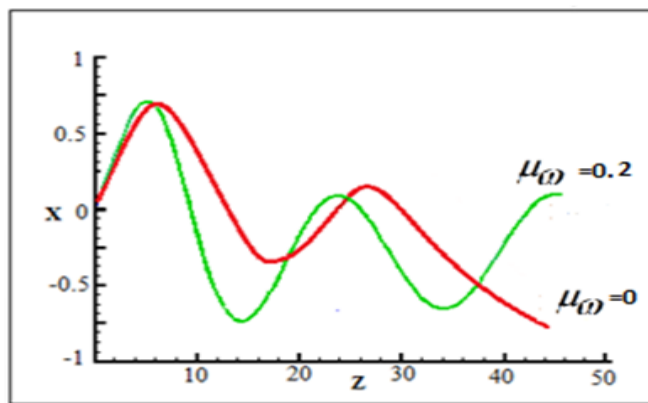
روابط تحلیلی بی‌بعد بدست آمده نهایی تنها با استفاده از روش‌های عددی قابل تجزیه و تحلیل می‌باشند که در بخش بعدی مقاله به کمک روش عددی رانگ-کوتا مرتبه چهار و کد شبیه‌سازی نسبیتی تک ذره سه بعدی به بررسی دینامیک الکترون پرداخته‌ایم.

نتایج عددی:

در این بخش برای تحلیل رفتار الکترون تحت تأثیر بار فضایی یون و میدان مغناطیسی ویگلر تخت با استفاده از معادلات به‌دست آمده در بخش قبل، از روش رانگ-کوتا مرتبه چهار و کد تک ذره نسبیتی سه بعدی استفاده شده است. این معادلات برای پارامترهای مشخص $a_p = 0.87$, $r_2 = 4$, $r_1 = 2$, $\theta_0 = \pi/2$, $k = 1.01$, $\varphi_0 = 0.5$ ، که در واقع شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای بررسی مسئله مورد نظر می‌باشند، حل شده‌اند. برای بررسی اثرات اعمال یک میدان مغناطیسی ویگلری تخت در شتابدهی الکترون و در حضور کانال یونی، نمودار انرژی الکترون برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی ویگلری تخت در $X_0 = 0.5$ در شکل ۱ نشان داده شده است. بررسی نمودارهای انرژی الکترون، تأثیر مثبت حضور میدان مغناطیسی ویگلری تخت را بخوبی نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش دامنه میدان ویگلری تخت باعث افزایش انرژی الکترون در فواصل کوتاه می‌گردد اما در فواصل دورتر برای مقادیر بزرگتر دامنه میدان این روند افزایشی کاهش می‌یابد. بنابراین انتخاب دامنه میدان مغناطیسی ویگلری مناسب می‌تواند در طراحی شتابدهنده‌های پلاسمایی با ابعاد کوچک حائز اهمیت باشد. شکل ۲ نمودار مسیر الکترون در حضور میدان مغناطیسی ویگلری تخت و عدم حضور ویگلر را نشان می‌دهد. الکترون حول مسیر انتشار لیزر (محور Z) حرکت کرده و انرژی لیزر را جذب می‌کند. حضور موج پلاسمایی باعث می‌شود نوسانات الکترون شکل متقارن خود را از دست بدهند. همانگونه که مشاهده می‌شود حضور میدان مغناطیسی ویگلر ($\mu_{\omega} = 0.2$) باعث یکنواختی بیشتر نوسانات حرکت ذره در طی انتشار آن نسبت به عدم حضور میدان ($\mu_{\omega} = 0$) می‌گردد.



شکل شماره (۱) انرژی الکترون در کانال یونی برای مقادیر متفاوت دامنه میدان مغناطیسی و یگلر تخت

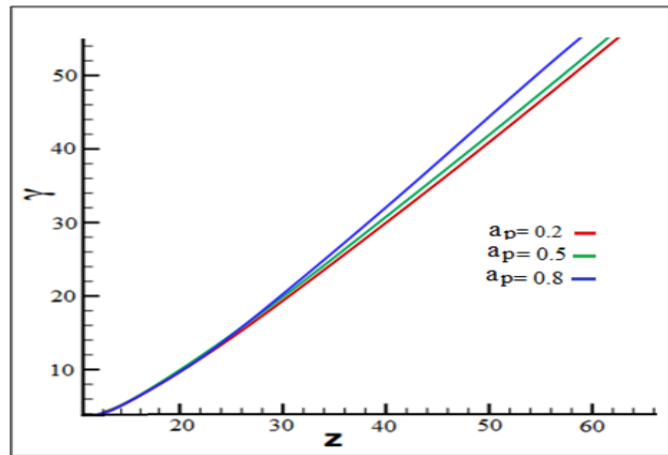


شکل شماره (۲) مسیر الکترون در کانال یونی در حضور میدان مغناطیسی و یگلر تخت ($\mu_{\omega} = 0.2$) و عدم حضور

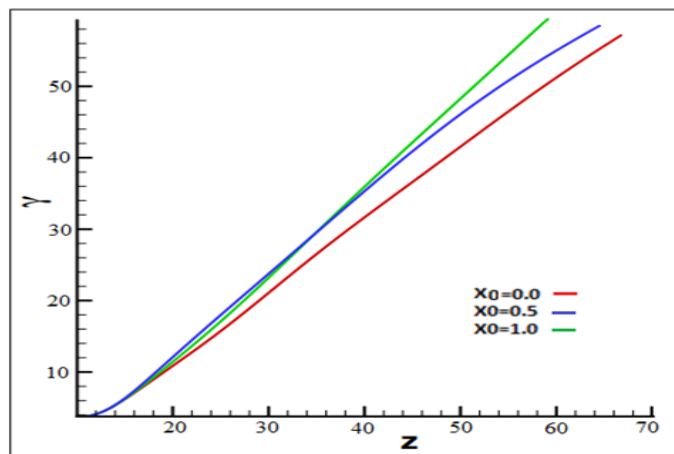
$$\text{آن } (\mu_{\omega} = 0)$$

در شکل ۳ نمودار انرژی الکترون بر حسب دامنه موج پلاسمایی ایجاد شده نشان داده شده است. الکترون حول مسیر انتشار لیزر (محور z) حرکت کرده و انرژی لیزر را از طریق موج پلاسمایی ایجاد شده جذب می‌کند. میدان متناظر با موج پلاسمایی باعث می‌شود نوسانات الکترون شکل سینوسی و متقارن خود را از دست بدهد. برای بررسی اثرات بار فضایی یون بر روی دینامیک الکترون در کانال یونی نمودار مسیر الکترون و نمودار شتاب الکترون در سه موقعیت اولیه

آن نسبت به محور کانال یونی را مورد بررسی قرار داده‌ایم. نمودار انرژی الکترون تحت تأثیر پتانسیل بار فضایی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش x_0 انرژی الکترون افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر انرژی بدست آمده توسط الکترون در فواصل دورتر از مرکز کانال بیشتر می‌باشد که این به دلیل افزایش تأثیرات بار فضایی یون می‌باشد که در فواصل دورتر از محور z بیشتر است.



شکل شماره (۳) انرژی الکترون برای دامنه‌های متفاوت موج پلاسمایی



شکل شماره (۴) انرژی الکترون در کانال یونی برای فواصل متفاوت از محور کانال



بحث و نتیجه گیری :

در این مقاله شتاب الکترون و دینامیک نسبیته آن در یک کانال یونی لیزری ایجاد شده در شتابدهنده پلاسمایی با ابعاد کوچک را با در نظر گرفتن اثرات مربوط به پتانسیل بار فضایی کانال یونی، موج پلاسمایی و در حضور یک ویگلر تخت مورد بررسی قرار داده‌ایم. الکترون در کانال یونی ایجاد شده، حول مسیر انتشار لیزر حرکت کرده و انرژی لیزر را جذب می‌کند. میدان متناظر با موج پلاسمایی باعث می‌شود نوسانات الکترون شکل سینوسی و متقارن خود را از دست بدهند و حضور میدان مغناطیسی ویگلری تخت باعث یکنواختی بیشتر نوسانات حرکت ذره در طی انتشار آن می‌گردد. نمودار بهره انرژی الکترون نشان می‌دهد افزایش دامنه میدان ویگلری تخت موجب افزایش انرژی الکترون می‌گردد که این روند افزایشی در فواصل کوتاه بیشتر می‌باشد. علاوه بر این با افزایش دامنه پتانسیل الکتروستاتیکی ناشی از کانال یونی ایجاد شده، انرژی الکترون افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده در این مقاله می‌تواند در انتخاب پارامترهای مناسب در طراحی شتابدهنده‌های پلاسمایی حائز اهمیت باشد.

مراجع :

- [1] Litos, M., Adli, E., An, W., Clarke, C. I., Clayton, C. E., Corde, S., Gessner, S. "High-efficiency acceleration of an electron beam in a plasma wakefield accelerator". *Nature*, **515**, (2014) 92.
- [2] Arefiev, A. V., Khudik, V. N., & Schollmeier, M. "Enhancement of laser-driven electron acceleration in an ion channel". *Physics of Plasmas*, **21**, (2014) 033104.
- [3] Esarey, E., Pilloff, M. "Trapping and acceleration in nonlinear plasma waves". *Physics of Plasmas*, **2**, (1995) 1432.
- [4] Wang, Z. Y., Tang, C. J., & Peng, X. D. "Cherenkov electromagnetic instability excited by an oscillating relativistic electron beam in ion channel". *Physics of Plasmas*, **17**, (2010) 083114.
- [5] Mehdian, H., Kargarian, A., Hasanbeigi, A. "Numerical study of electron acceleration by plasma wave in an ion channel under obliquely applied magnetic field". *Optik*, **126**, (2015) 329.
- [6] Kargarian, A., Mehdian, H., & Hasanbeigi, A. "Electron acceleration in an ion channel by a magnetized plasma wave". *Iranian Journal of Physics Research*, **14**, (2014) 83.
- [7] Sadegzadeh, S., Hasanbeigi, A., Mehdian, H., Alimohamadi, M. "Linear theory of magnetized ion-channel free-electron laser". *Physics of Plasmas*, **19**, (2012) 023108.
- [8] Mehdian, H., Hasanbeigi, A., Jafari, S. "Dispersion relation and growth rate in electromagnetically pumped free-electron lasers with ion-channel guiding". *Physics of Plasmas*, **15**, (2008) 073103.
- [9] Su, D., Tang, C. J. "The interaction of electromagnetic wave and plasma wave in an electron beam-ion channel system". *Physics of Plasmas*, **18**, (2011) 023104.
- [10] Kumar, N., Tripathi, V. K. "Effect of betatron resonance on plasma wave acceleration of electrons in an ion channel". *EPL (Europhysics Letters)*, **75**, (2006) 260.