



## جذب انرژی لیزر در پلاسمای مغناطیده و برخوردی

The absorption of laser energy in magnetized and collisional plasma

دشتستانی، سپیده

Sepideh Dashtestani

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک

Isfahan University Of Technology, Isfahan, Iran

### چکیده:

در این مقاله برهمکنش پالس لیزر پر توان با یک پلاسمای برخوردی و مغناطیده مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن گرمایش اهمی الکترون های پلاسما و نیروی پاندر ماتیهو ثابت دی الکتریکی غیر خطی برای محیط پلاسما محاسبه شده است. همچنین معادله انتشار موج الکترومغناطیسی برای پلاسمای مغناطیده و برخوردی حل شده است. نتایج حاصل از حل عددی با روش رانگ کوتای مرتبه چهار نشان می دهد که در برهمکنش لیزر-پلاسما دامنه میدان الکتریکی لیزر با افزایش قدرت پالس لیزر افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می دهند که در میدان مغناطیسی قوی تر، دامنه میدان الکتریکی به صورت قابل توجهی افزایش می یابد و طول موج کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از تغییرات چگالی جریان نشان می دهد که، چگالی الکترون ها با افزایش قدرت پالس لیزر افزایش یافته و پروفایل چگالی جریان باریک تر خواهد شد. همچنین در میدان های مغناطیسی خارجی قوی تر دامنه میدان الکتریکی روند رو به رشدی را از خود نشان می دهد. در انتها نتایج حاصل با نتایج و محاسبات مشابه، مقایسه شده است.

In this paper, the interaction of high-power laser pulse with collisional and magnetized plasma has been investigated. Considering the heating of the plasma electrons and the Pondermotive force, the nonlinear dielectric constant for the plasma is calculated. The electromagnetic wave emission equation for magnetized and collisional plasma has also been solved. The results of the numerical solution by the Fourier rank-Kuta method show that in the interaction of laser-plasma, the amplitude of the laser electric field has increased with increasing laser pulse power. The results also show that in the stronger magnetic field, the electric field amplitude increases significantly and the wavelength will decrease. The results of the current density variation show that the electron density increases with increasing laser pulse power and the current density profile will be narrower. Also, in the stronger external magnetic fields, the range of electric field shows a growing trend. Finally, the results are compared with similar results and calculations.

کلمات کلیدی: (collisional plasma, absorption coefficient, ohmic heating)

مقدمه :



برهمکنش پالس لیزر با پلاسما به علت رنج وسیعی از کاربردهایی که در شتاب دهنی ذرات [۱ و ۲]، پزشکی و فیوژن دارد به صورت گسترده مورد توجه واقع شده است. برهمکنش پالس لیزر با الکترون‌ها موجب حرکت و نوسان الکترون‌ها درون پلاسما می‌شود [۲]. در نتیجه یک نیروی پاندر ماتئو درون پلاسما شکل می‌گیرد. در این مقاله انتشار یک موج الکترومغناطیسی در پلاسمای کم چگال در حضور میدان مغناطیسی خارجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله چگالی الکترون‌ها تحت تاثیر نیروی پاندر ماتئو و میدان مغناطیسی پلاسما محاسبه شده است. همچنین معادله انتشار موج الکترومغناطیسی بررسی و حل شده است. سپس نرخ اتلاف انرژی لیزر و ضریب جذب محاسبه شده است. بنابراین تاثیر میدان مغناطیسی پلاسما بر روی نرخ اتلاف انرژی و ضریب جذب بررسی شده است. تا قبل از این چگالی الکترون‌ها و ضریب جذب انرژی لیزر در شرایط مختلف (پلاسمای مغناطیده و غیر مغناطیده) محاسبه شده است [۳ و ۴]. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت پالس لیزر دامنه میدان الکتریکی و چگالی الکترون‌ها به صورت قابل توجهی تغییر خواهد کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی تر اتلاف انرژی لیزر و ضریب جذب متفادت از نتایج حاصل از پلاسمای غیر مغناطیده می‌باشد. در انتها نتایج به دست آمده با نتایج و بررسی‌های انجام شده تا به امروز مقایسه شده است.

### روش کار:

در این بخش به بررسی برهمکنش پالس لیزر پر توان با پلاسمای مغناطیده و برخوردی در رژیم ایزوترمال می‌پردازیم. در این مدل موج الکترومغناطیسی با قطبش خطی و فرکانس زاویه ای  $\omega$  در نظر گرفته شده است  $E(z, t) = \hat{x}E(z)\exp(-i\omega t)$ . این موج الکترومغناطیسی در جهت  $+z$  درون خلا حرکت می‌کند. همچنین فرض می‌کنیم فضای  $z > 0$  توسط یک پلاسمای همگن اشغال شده است. و پالس لیزر در جهت  $z > 0$  به صورت عمود بر پلاسما حرکت می‌کند. با استفاده از قانون اهم و فارادی خواهیم داشت:

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (۱)$$

$$\nabla \times B = -\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} J = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} \quad (D = \epsilon E) \quad (۲)$$

$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho \quad (۳)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (۴)$$



چگالی جریان الکترون ها به صورت  $J = -n_e e v_e$  می باشد. با در نظر گرفتن اثرات برخوردی و میدان مغناطیسی پلاسما سرعت الکترون ها به صورت زیر به دست می آید:

$$v_e = \left( \frac{e}{im_e(\omega + i\nu_{ef})} \right) E \quad (5)$$

با استفاده از معادلات بالا داریم:

$$-\frac{\partial E_x}{\partial z} = -i \frac{\omega}{c} B_y \quad (6)$$

$$-\frac{dB_y}{dz} = -i \frac{\omega}{c} E_x - \frac{4\pi}{c} n_e e v_{ex} \quad (7)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} E_x + \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \epsilon E_x = 0 \quad (9)$$

$E_x$  مولفه میدان الکتریکی در جهت X،  $B_y$  مولفه میدان مغناطیسی در جهت Y و  $v_{ex}$  سرعت الکترون ها در جهت X می باشد. در ادامه معادله حرکت الکترون ها را در یک پلاسما برخوردی و با در نظر گرفتن فشار الکترون ها به صورت  $P_e = n_e T_e$  (دمای الکترون ها) به دست می آوریم:

$$m_e n_e \left[ \frac{\partial v_{ex}}{\partial t} + (v_e \cdot \nabla) v_{ex} + \nu_{ef} v_{ex} \right] = -en_e E - en_e \frac{v_e \times B}{c} - n_e e \nabla \phi - \nabla P_e \quad (10)$$

$v_e, m_e$  جرم و سرعت الکترون و  $\phi$  میانگین پتانسیل پاندر ماتیو می باشد. میانگین پتانسیل پاندر ماتیو شکلی به صورت زیر خواهد داشت:

$$\phi = \frac{eE_x^2}{m_e(\omega + i\nu_{ef})^2} \quad (11)$$

همچنین در این جا نیروی پاندر ماتیو را به صورت

$$F_p = -n_e e \nabla \phi$$

تعریف می کنیم. با استفاده از تقریب مرتبه اول معادله حرکت به صورت زیر خواهد بود:

$$m_e \left( \frac{\partial v_{ex}}{\partial t} + \nu_{ef} v_{ex} \right) = -eE_x \quad (12)$$



$$\frac{-eB_0\vartheta_x}{c} - \frac{\partial\varphi}{\partial z} - \frac{1}{n_{0e}} \frac{dP_e}{dz} = 0 \quad (13)$$

$B_0$  میدان مغناطیسی پلاسما (هم جهت با میدان مغناطیسی لیزر) و  $n_{0e}$  بیشینه چگالی الکترون ها می باشد. با استفاده از معادله (۱۲) و (۱۰) و (۸) چگالی الکترون ها را برای یک پلاسما مغناطیده و برخوردی به صورت زیر محاسبه می کنیم:

$$n_e = n_{0e} \exp\left(\frac{-e^2(E_x^2 - B_0 B_y)}{2m_e T_e (\omega^2 + \vartheta_{ef}^2)}\right) \quad (14)$$

در رابطه (۱۳) میدان مغناطیسی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده است. در اینجا کمیت های زیر را تعریف می کنیم:

$$a = \frac{eE}{m_e c_s (\omega^2 + \vartheta_{ef}^2)^{1/2}}, \quad \Omega = \frac{\omega_{pe0}}{\omega}, \quad \xi = \frac{z\omega}{c}, \quad \vartheta_0 = \frac{\vartheta_{ef}}{\omega}$$

بنابراین چگالی الکترون ها در یک پلاسما مغناطیده برخوردی و ایزوترمال به صورت زیر به دست آمده است.

$$n_e = n_{0e} \exp\left(-\frac{a^2}{2} - i\frac{b}{2}\frac{\partial a}{\partial \xi}\right) \quad (15)$$

با استفاده از معادلات (۱۵) و (۹) خواهیم داشت:

$$\frac{d^2 a}{d\xi^2} + \left\{1 - \frac{\Omega^2}{1 + i\vartheta_0} \exp\left(-\frac{a^2}{2} - i\frac{b}{2}\frac{\partial a}{\partial \xi}\right)\right\} a = 0 \quad (16)$$

با حل معادله (۱۶) و با استفاده از روش رانگ کوتا (مرتبه چهار) تغییرات میدان الکتریکی لیزر و چگالی بررسی می شوند. تغییرات چگالی الکترون ها بر حسب طول پلاسما در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین میدان الکتریکی نرمالایز شده بر حسب طول پلاسما در شکل (۱) رسم شده است. با استفاده از معادلات (۱۳) و (۱۲) و (۱۰) ثابت دی الکتریک برای یک پلاسما مغناطیده برخوردی مغناطیده به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 - \frac{\omega_c m_e c^2}{\omega T_e} - \frac{i\vartheta_{ef}}{\omega}\right)\right) \quad (17)$$



فرکانس  $\omega_p^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e}$  فرکانس الکترون های پلاسما،  $n_e$  چگالی الکترون های پلاسما و  $\omega_c = \frac{eB}{cm}$  فرکانس سیکلوترونی می باشد. با توجه به رابطه (۱۷ و ۱۵) داریم:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left( 1 - \frac{\omega_{p0}^2}{\omega^2} \left( 1 - \frac{\omega_c m_e c^2}{\omega T_e} - \frac{i\vartheta_{sf}}{\omega} \right) \right) \exp\left(-\frac{a^2}{2} - i\frac{b}{2} \frac{\partial a}{\partial \xi}\right) \quad (18)$$

در اینجا به محاسبه نرخ اتلاف انرژی لیزر می پردازیم.

$$k_{ib} = 2I_m\{k\} \approx \frac{\omega}{c} \left\{ 1 - \frac{\omega_{p0}^2 \exp\left(\frac{-a^2}{2}\right) \cos\left(\frac{b}{2} \frac{\partial a}{\partial \xi}\right)}{\omega^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \times$$

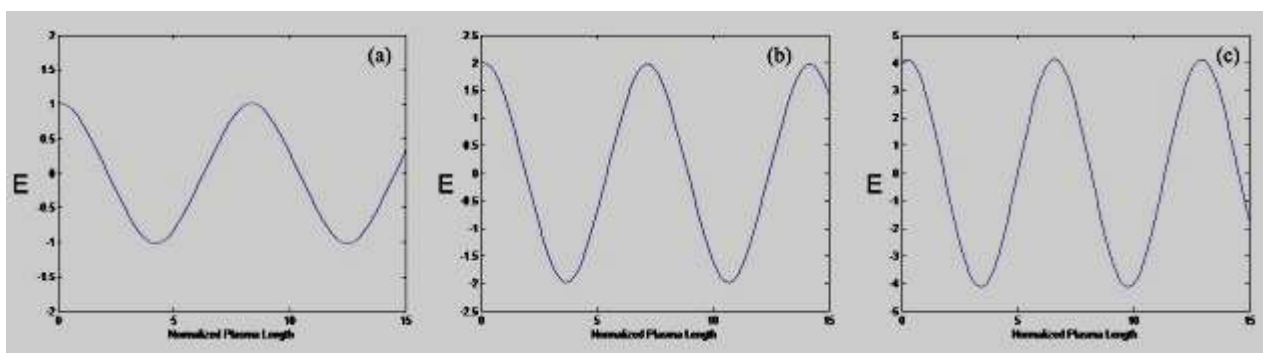
$$\left( \frac{\omega_{p0}^2}{\omega^2} \exp\left(\frac{-a^2}{2}\right) \right) \times \left[ \frac{\vartheta_{sf}}{\omega} \cos\left(\frac{b}{2} \frac{\partial a}{\partial \xi}\right) - \frac{\omega_c m_e c^2}{\omega T_e} \sin\left(\frac{b}{2} \frac{\partial a}{\partial \xi}\right) \right] \quad (19)$$

نتایج به دست آمده در معادلات (۱۷-۱۹) با دیگر نتایج به دست آمده برای ثابت دی الکترونیک و نرخ اتلاف انرژی لیزر متفاوت می باشد [۳]. با توجه به معادله (۱۶) کمیت  $a$  دارای یک بخش حقیقی و یک بخش موهومی می باشد. بنابراین در محاسبه قسمت موهومی معادله (۱۹) باید تنها بخش موهومی جملات در نظر گرفته شود. بنابراین این معادله کاملا متفاوت از نتایج به دست آمده تا کنون خواهد بود. تغییرات شدت لیزر بر حسب طول  $Z$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{dI}{dz} = -k_{ib} I \quad (20)$$

بنابراین ضریب جذب، برای یک پلاسما با طول  $L$  برابر است با:

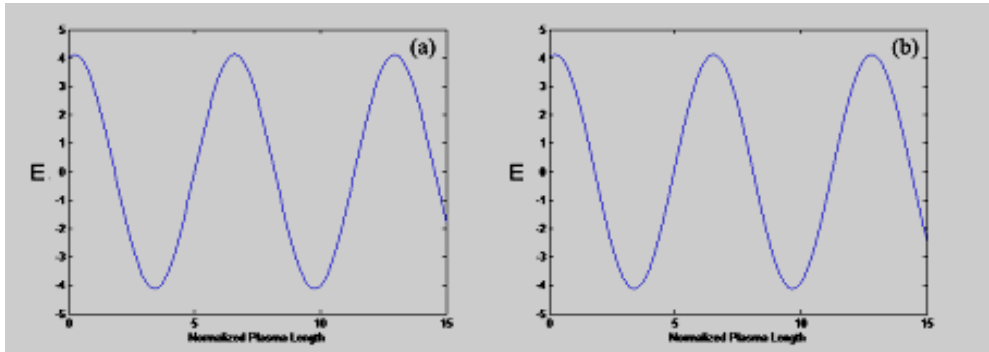
$$\alpha_{abs} = \frac{I_{in} - I_{out}}{I_{in}} = 1 - \exp\left(-\int_0^L k_{ib} dz\right) \quad (21)$$



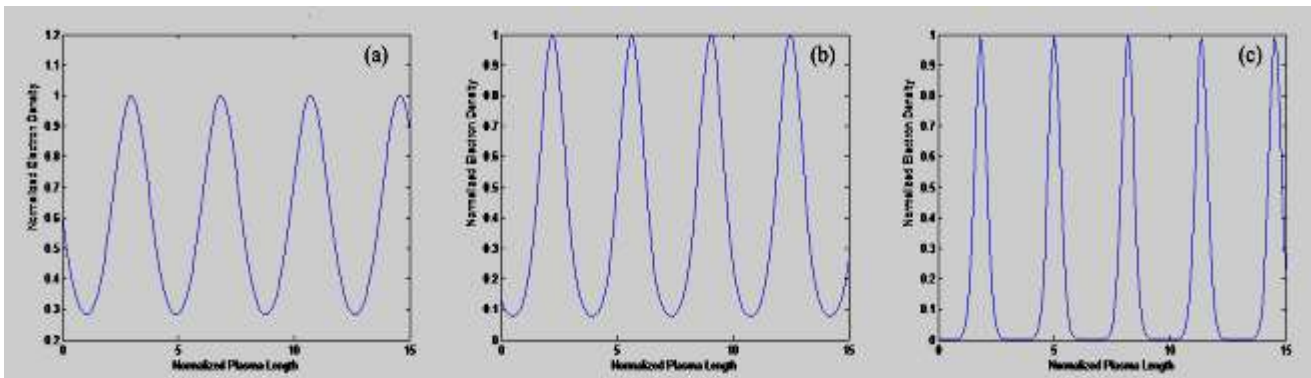
شکل شماره (۱): تغییرات میدان الکترونیکی نرمالایز شده بر حسب طول



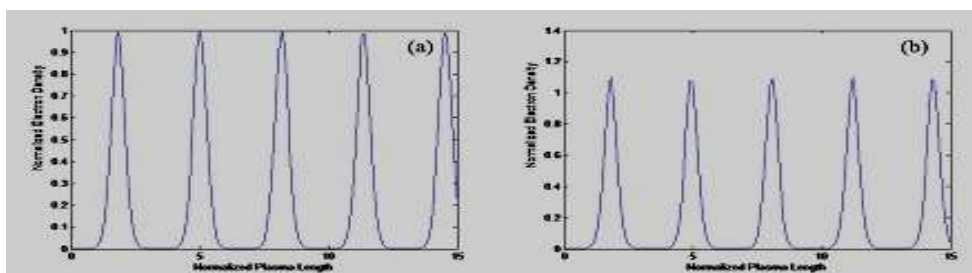
پلازما (a)  $a_0=1$ ، (b)  $a_0=2$  و (c)  $a_0=4$



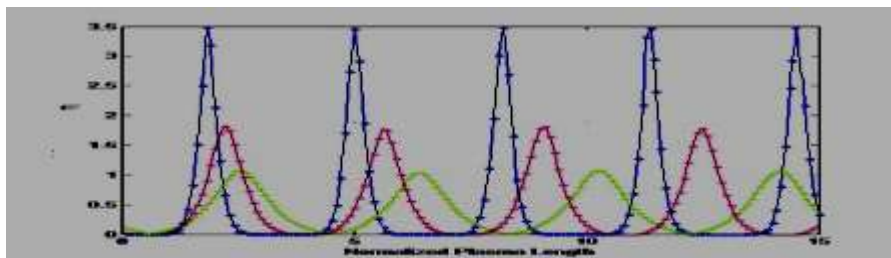
شکل شماره (۲): تغییرات میدان الکتریکی نرمالایز شده بر حسب طول پلازما (a)  $a_0=4$ ,  $B_0=20MG$ ، (b)  $B_0=50MG$ .



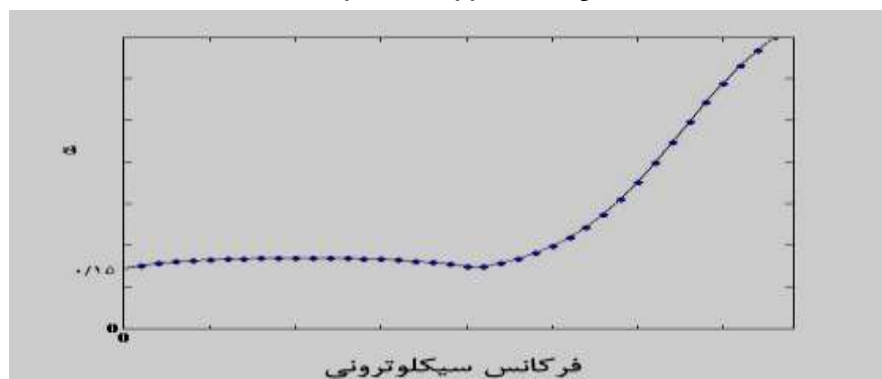
شکل شماره (۳): تغییرات چگالی الکترون ها نرمالایز شده بر حسب طول پلازما (a)  $a_0=1$ ، (b)  $a_0=2$  و (c)  $a_0=4$



شکل شماره (۴): تغییرات چگالی الکترون ها نرمالایز شده بر حسب طول پلازما (a)  $a_0=4$ ,  $B_0=20MG$ ، (b)  $B_0=50MG$ .



شکل شماره ۵): تغییرات  $\tilde{\gamma}$  بر حسب طول پلاسما .  
 $a_0=1$  (سبز),  $a_0=2$  (قرمز) و  $a_0=4$  (آبی)



شکل شماره ۶): تغییرات ضریب جذب نرمالایز شده بر حسب فرکانس سیکلوترون

## نتایج:

در این مقاله برهمکنش پالس لیزر پر توان با پلاسماهای برخوردی ایزوترمال در حضور میدان مغناطیسی خارجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد که دامنه میدان الکتریکی با افزایش شدت پالس لیزر افزایش یافته و طول موج کاهش می یابد. با افزایش میدان مغناطیسی دامنه میدان الکتریکی افزایش یافته و طول موج کاهش یافته است. به علاوه با افزایش شدت پالس لیزر پروفایل چگالی الکترون ها باریک تر می شود. در میدان های مغناطیسی قوی تر چگالی الکترون ها رشد خواهد کرد. همچنین ضریب جذب انرژی لیزر با افزایش میدان مغناطیسی خارجی به صورت چشمگیری افزایش می یابد.

## مراجع :

- [1] M. Vranic, O. Klimo, G. Korn, S. Weber - arXiv: 1710.07220, 2017.
- [2] A. Macchi, M. Borghesi, M. Passoni, Reviews of modern Physics. 85, 751, 2013.
- [3] M. Sedaghat, M. Ettehad-Abari, B. Shokri and M. Ghorbanalilu, Physics of plasma. 22, 033114, 2015.
- [4] M Ettehad-Abari, M Sedaghat, B Shokri and M Ghorbanalilu, Plasma Phys. Control. Fusion 57, 85001, 2015