

بررسی اثرات نیروی پاندرموتیو در برهمکنش لیزرپر شدت با پلاسمای مغناطیده کم چگال اتلافی

لیلا رجایی^۱ و مریم جعفری^۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲۸

چکیده: نیروی پاندرموتیو یک مفهوم مهم در فیزیک پلازما است که نقش مهمی در بسیاری از جنبه های تئوری برهمکنش لیزر پلازما شامل مسائل موجود در شتاب میدان عقبه ای و تقویت رامان را ایفا می کند. این نیروی غیر خطی به دلیل میدان الکترومغناطیسی با شدت بالا در تعامل با پلازما ایجاد می شود و عامل ایجاد فرایندهای غیر خطی زیادی در پلازما می گردد مانند تولید اشعه ایکس و شتاب دهی الکترون. یکی از فرایندهای غیر خطی ایجاد شده در این سیستم تاثیر متقابل میدان الکترومغناطیسی لیزر و چگالی پلازما بر روی یکدیگر است. در این مقاله یک پلاسمای غیر یکنواخت برخوردی مغناطیده در نظر گرفته شده است که در معرض یک لیزر پر شدت قرار می گیرد. هدف اصلی ما بررسی تغییرات پروفایل میدان الکتریکی و چگالی پلازما به دلیل نیروی پاندرموتیو در حضور برخورد ذرات است. همچنین بررسی اثرات میدان مغناطیسی خارجی روی انتشار امواج لیزر درون پلازما می باشد. یکی دیگر از فرایندهای بررسی شده در این سیستم بررسی اثرات فرکانس برخورد روی پروفایل چگالی و موج لیزر می باشد.

واژه های کلیدی: پلاسمای کم چگال اتلافی، لیزر پر شدت، نیروی پاندرموتیو.

مقدمه:

این نیرو باعث ایجاد پدیده های مختلفی شامل (۱) خودکانونی و رشته سازی پرتو لیزر (۲) تغییر پروفایل چگالی لیزر و شکل گیری سالیتون ها (۳) ناپایداری پارامتریک (۴) تولید میدان مغناطیسی و (۵) تولید هارمونیک دوم می باشد [۵]. برخی نویسندگان تحقیقاتی در زمینه های مختلف پلاسمای ناهمگن و نیروی پاندرموتیو انجام داده اند. به عنوان مثال: تاثیر نیروی پاندرموتیو روی پلاسمای کم چگال با پروفایل چگالی خطی [۶] و اثر میدان مغناطیسی خارجی روی توزیع چگالی و میدان های الکترومغناطیسی در برهم کنش لیزر فوق شدید با پلاسمای کم چگال غیر برخورد [7-10].

برخورد بین ذرات یکی از عوامل اتلاف انرژی در سیستم های سیالی است. این اثرات اتلافی در انتشار امواج از محیطهای پلاسمایی نیز اثر می گذارند. هدف ما در این

همراه با پیدایش فن آوری تقویت پالس چریپ، لیزرهای فمتوثانیه که دارای پالس های فوق العاده شدید و میدان های الکتریکی فوق العاده بالا هستند پیشرفت چشمگیری داشتند [۱]. برهمکنش لیزرهای پر شدت با پلازما عامل ایجاد فرایندهای غیر خطی می باشد [۲]. یکی از عوامل ایجاد این فرایندهای غیر خطی نیروی پاندرموتیو است [۳]. پدیده های غیر خطی بسیاری در برهم کنش موج الکترومغناطیسی فرکانس بالا با پلازما در ارتباط با نیروی پاندرموتیو هستند. به طور کلی نیروی پاندرموتیو یک نیروی ذره باردار در پلازما است [۴].

که ضریب گذردهی محیط پلاسما از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+v/\omega)} \quad (7)$$

در این رابطه $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m}}$ فرکانس پلاسما می‌باشد.

با جایگذاری معادله (۶) در معادلات برای گذردهی دی الکتریک پلاسما رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\omega_{p0}}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+v/\omega)} \exp\left(\frac{e^2 E^2}{m T_e \omega^2}\right) \quad (8)$$

و در آخر با استفاده از ضریب گذردهی ε و جایگذاری در رابطه (۴) معادله‌ی میدان الکتریکی به صورت مقابل محاسبه می‌شود:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega_{p0}}{\omega}\right)^2 \frac{1}{(i+v/\omega)} \exp\left(\frac{e^2 E^2}{m T_e \omega^2}\right)\right) E = 0 \quad (9)$$

نتایج محاسبات عددی:

با بررسی برهمکنش لیزر شدت بالا با پلاسما کم چگال ناهمگن در بخش قبل دیدیم که معادله (۹) بدست آمده به شدت غیر خطی است و بنابراین برای حل آن و محاسبه میدان الکتریکی از روش عددی رانگ کوتا مرتبه چهار استفاده کردیم با استفاده از نرم افزار متلب نمودارهای میدان الکتریکی و چگالی الکترون‌ها را برای حالت اتلافی و غیر اتلافی رسم کردیم.

پارامترهای لیزر و پلاسما استفاده شده در این مقاله $L=2\mu m$ ، $I=5 \times 10^{17} W/cm^2$ هستند. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را بر حسب تغییر طول موج لیزر تابیده شده و در دو حالت اتلافی و بدون اتلافی بررسی می‌نماییم از آنجاییکه معادله میدان الکتریکی (معادله (۹)) غیرخطی است ما مجبور هستیم این معادله را بصورت عددی حل نماییم نتایج حل عددی در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان دهنده تغییرات میدان الکتریکی بر حسب فاصله است مطابق این نمودار با افزایش طول موج نور لیزر طول موج میدان الکتریکی منتشر شده

مقاله بررسی اثرات برخورد در انتشار نور لیزر در یک محیط باردادار پلاسمایی است. بنابراین برای بررسی اثرات برخورد روی انتشار موج الکترومغناطیس از یک پلاسمایی اتلافی، چگونگی تغییرات پروفایل میدان الکتریکی و پروفایل چگالی الکترون‌ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

معادلات حاکم:

پرتو نور یک موج الکترومغناطیسی است که میدان الکتریکی آن در حال نوسان است. با در نظر گرفتن برخوردها در پلاسما، معادلات خطی شده حاکم عبارتند از:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{e}{m} E - vV \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times B = -\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} - \frac{4\pi n_e(z) eV}{c} \quad (3)$$

در روابط فوق V ، E ، B ، c برتریب سرعت الکترون، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و سرعت نور است. از آنجاییکه پلاسما ناهمگن است چگالی تعادلی الکترون به z بستگی دارد $n_{e0}(z) = n_{cr} \frac{z}{L}$ ، چگالی بحرانی و L طول ناهمگنی پلاسما است) و نهایتاً عبارت آخر در معادله اول نشان دهنده ترم اتلافی است و v فرکانس برخورد است. با استفاده از معادلات ماکسول معادله میدان الکتریکی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

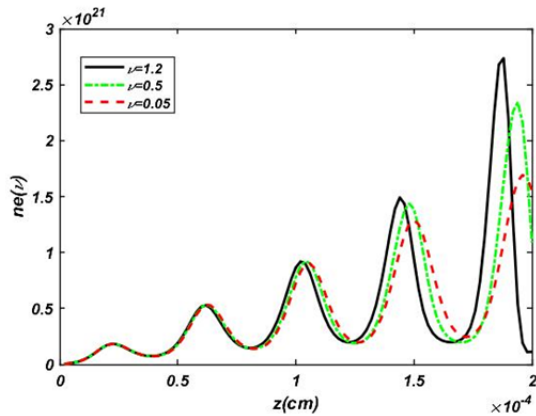
$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left(1 - \frac{4\pi n_e(z) e^2}{m \omega (i\omega - v)}\right) E = 0 \quad (4)$$

با در نظر گرفتن تعادل بین گرادیان فشار پلاسما و نیروی پاندرموتیو خواهیم داشت:

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dz} = -\frac{e^2}{m T_e \omega^2} \frac{dE^2}{dz} \quad (5)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۵) در محیط پلاسمایی ناهمگن:

$$n_e(z, E^2) = n_{e0}(z) \exp\left(\frac{e^2 E^2}{m T_e \omega^2}\right) \quad (6)$$



شکل ۳) چگالی الکترون برای فرکانس های برخورد مختلف

$\nu = 0.05$ (خط چین) $\nu = 0.5$ (نقطه خط)
 $\nu = 1.2$ (خط سیاه)

نتیجه گیری:

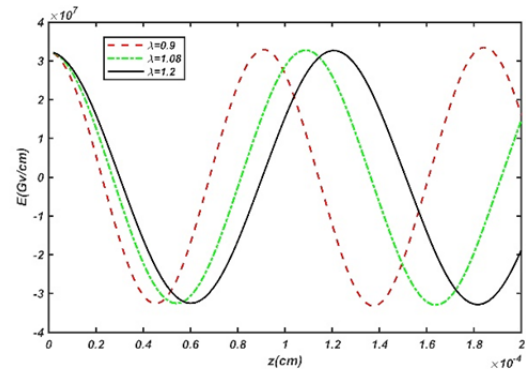
در این مقاله، انتشار یک موج الکترومغناطیسی پر شدت را از یک پلاسمای ناهمگن مورد بررسی قرار دادیم. همانطور که بیان شد نیروی پاندرموتیو باعث تغییر در چگالی الکترون ها و میدان لیزر می شود. با حل معادله موج و با استفاده از برنامه رانگ کوتا در نرم افزار متلب نمودارهای میدان الکتریکی و چگالی الکترون را برای دو حالت اتلافی و غیر اتلافی رسم کردیم.

شدت اولیه لیزر را $I = 5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ در نظر گرفتیم. همانطور که دیدیم با افزایش طول موج لیزر پروفایل میدان الکتریکی پهن می شود. و برای فرکانس های برخورد مختلف مشاهده کردیم که با افزایش فرکانس برخوردی میدان الکتریکی تغییر چندانی نخواهد کرد. همچنین با افزایش فرکانس برخوردی پلازما چگالی الکترون افزایش می یابد و طول موج نوسانات کاهش می یابد.

مراجع

- [1] Eliezer, Shalom, and Kunioki Mima, eds. *Applications of laser-plasma interactions*, CRC press, (2008).
 [2] Hora, Heinrich. *Plasmas at high temperature and density: applications and implications of laser-plasma interaction*. Vol. 1. Springer Science & Business Media, (2008).

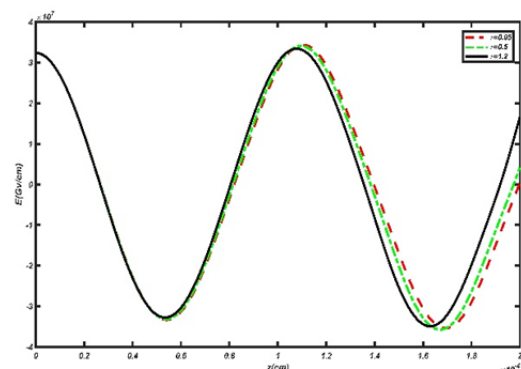
در پلازما کوتاه تر میگردد. قابل ذکر است که در حالت غیر اتلافی این نمودار قبلاً محاسبه شده است [۶].



شکل ۱) میدان الکتریکی در حالت غیر اتلافی برای طول موج های مختلف

نقطه $\lambda = 1.08$ و (خط چین) $\lambda = 0.9$ (خط سیاه) $\lambda = 1.2$
 (خط)

برای بررسی اثرات اتلافی در یک طول موج خاص میدان الکتریکی برای فرکانسهای برخورد مختلف در شکل (۲) رسم شده است. همانگونه که دیده می شود با اثرات اتلافی فقط باعث تغییر در طول موج میدان الکتریکی میشود و همانگونه که از نمودار معلوم است طول موج میدان الکتریکی به مکان وابسته می شود. نهایتاً با استفاده از رابطه (۶) تغییرات چگالی برحسب فاصله برای فرکانسهای برخورد متفاوت در شکل (۳) رسم شده است مطابق این شکل با پیشرفت موج لیزر درون پلازما تاثیر فرکانس برخورد بیشتر دیده می شود و با افزایش فرکانس برخورد چگالی نواحی پلازما افزایش میابد.



شکل ۲) میدان الکتریکی در حالت اتلافی برای

فرکانس های برخورد مختلف:
 $\nu = 0.05$ (خط چین) و $\nu = 0.5$ (نقطه خط)
 و $\nu = 1.2$ (خط سیاه)

-
- [7] Mahmoodi-Darian, Masoomeh, Mehdi Etehadi-Abari, and Mahsa Sedaghat. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **10**, **1** (2016).
- [8] Lamb, B.M., *Ponderomotive Effects in Nonadiabatic Regimes and in Nonneutral Plasmas*, (1983).
- [9] Chen, F.F., *Introduction to plasma physics*. 2012: Springer Science & Business Media.
- [10] Alimi, J.-M., P. Mora, and R. Pellat, *Journal de Physique* **48**(4): p. 585-590. (1987)
- [3] Burton, D.A., Cairns, R.A., Ersfeld, B., Noble, A., Yoffe, S. and Jaroszynski, D.A., Vol 10234, International Society for Optics and Photonics, (2017).
- [4] Shokri, B., and A. R. Niknam. *Physics of plasmas*, **13**, **11** (2006).
- [5] Eliezer, Shalom. *The interaction of high-power lasers with plasmas*. CRC press, (2002).
- [6] Niknam, Ali Reza, Mojtaba Hashemzadeh, and Mohammad Mahdi Montazeri. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **38**, **9** (2010).