بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک
و فوتونیک ایران و سیزدهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۳-۱۲۴۶-۱۰-A

مدل‌سازی و شبیه‌سازی دو بعدی برهم‌کنش پالس لیزری فوق کوتاه با پلاسمای غیرچگال

آمنه کارگریان

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران
akargarian@aeoi.org.ir

چکیده – در این مقاله، برهم‌کنش یک پالس لیزری پرشدت و فوق کوتاه با پلاسمای غیریکنواخت رقیق و انتشار امواج برانگیخته شده در پلاسما را با استفاده از یک کد شبیه‌سازی ذره‌ای الکترومغناطیسی دو بعدی مورد بررسی قرار می‌دهیم. با عبور پالس لیزر پر شدت و فوق‌کوتاه از پلاسما، امواج پلاسمایی در راستای انتشار و در پشت پالس لیزری ظاهر می‌شوند. با گذشت زمان، موج پلاسمایی قوی ایجاد شده در دامنه خود دچار اعوجاج شده و پدیده شکست موج اتفاق می‌افتد. با شکست موج و انتقال انرژی آن به محیط، انرژی ذرات پلاسما افزایش می‌یابد. در این مقاله نشان می‌دهیم با عبور پالس لیزری از یک پلاسما با چگالی غیریکنواخت، موج پلاسمایی برانگیخته شده در دامنه‌هایی زیر دامنه شکست موج دچار اعوجاج شده و پدیده شکست اتفاق می‌افتد. علت این پدیده، وابستگی مکانی فرکانس مشخصه موج ایجاد شده می‌باشد که با گذشت زمان منجر به پدیده شکست در زیر دامنه شکست موج در پلاسما با چگالی یکنواخت، می‌شود.

کلید واژه- چگالی غیریکنواخت، شکست موج، فرکانس مشخصه، لیزر فوق کوتاه

Modeling and 2D simulation of ultrashort laser-underdense plasma interaction

Ameneh Kargarian

Plasma Physics and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,Tehran, Iran
akargarian@aeoi.org.ir

Abstract- In this paper, we investigate the interaction of an intense ultrashort laser pulse with an underdense non-uniform plasma and propagation of the excited plasma waves, using a 2D electromagnetic PIC simulation code. Passing the intense ultrashort in plasma, the plasma waves appear in the propagation direction behind the laser pulse. The amplitude of the excited strong plasma wave gets distorted over time and therefore the wave-breaking phenomenon occurs. The wave-breaking phenomenon increases the energy transmission of the wave to the plasma particles.In the present paper, we illustrate that passing the laser through a non-uniform plasma, the excited plasma wave gets distorted in amplitudes below the wave-breaking threshold. The reason of this phenomenon can be attributed to the spatial dependency of the wave characteristic frequency which leads to the breaking of wave below the breaking amplitudes in a uniform plasma.

Keywords: Characteristic frequency, Non-uniform density, ultrashort laser wave-breaking

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

در برهم‌کنش پالس‌های لیزری پرتوان و فوق کوتاه با پلاسما، مدهای نوسانی طولی در پشت پالس لیزری ایجاد می‌شوند که امواج پلاسمایی نامیده می‌شوند. هنگامی‌که یک موج با دامنه بزرگ که ممکن است در ابتدا دامنه‌ی کوچکی داشته باشد، در پلاسما برانگیخته می‌شود، به دلیل ناپایداری موج در محیط که منجر به رشد نمایی دامنه‌ی آن می‌شود، اثرات غیرخطی پدیدار می‌شوند[۱]. غیرخطی بودن منجر به تغییر شکل موج و در نتیجه شکست آن می‌شود[۲-۳]. موج ایجاد شده می‌تواند در اثر برخی عوامل که باعث وابستگی مکانی فرکانس مشخصه موج می‌شوند دچار اعوجاج شده و در نتیجه در دامنه‌های قبل از دامنه شکست دچار اعوجاج شود. با شکست موج و میرایی آن در محیط انرژی ذرات پلاسما افزایش می‌یابد که این انرژی می‌تواند بصورت گرمایش و یا شتاب ذرات در راستای انتشار لیزر باشد. عوامل مختلفی از جمله چند یونی بودن پلاسما[۴]، مغناطیدگی [۵] و اثرات جرم نسبیتی منجر به این پدیده می‌شوند. در این مقاله با استفاده از شبیه سازی ذره‌ای پلاسما به بررسی تأثیر اثرات پدیده شکست موج در یک پلاسمای غیریکنواخت می‌پردازیم.

مدلسازی و شبیه‌سازی دوبعدی پلاسما

روش شبیه سازی استفاده شده در این مقاله برای بررسی انتشار یک لیزر پرتوان با پالس کوتاه در محیط پلاسمای رقیق روش ذره‌ای (ذره در جعبه) [۶] می‌باشد. در این روش چگالی ذرات بر روی شبکه به طریق وزن‌دهی محاسبه می‌شوند. سپس میدان الکتریکی شبکه از طریق درون‌یابی در محل ذرات محاسبه شده و تحول آنها را موجب می‌شود [۷-۸]. در این روش هر ذره مطابق با نیروی لورنتس اعمال شده توسط میدان‌های الکترومغناطیسی در موقعیت ذره حرکت می‌کند:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}) \quad (۱)$$

تحول میدان‌ها نیز بر طبق معادلات ماکسول انجام می‌شود:

$$\vec{\nabla}.\vec{E} = 4\pi\rho \quad (۲)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\vec{j} \quad (۳)$$

$$-\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (۴)$$

$$\vec{\nabla}.\vec{B} = 0 \quad (۵)$$

$$\vec{j}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{N} q_i v_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (۶)$$

$$\rho(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{N} q_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (۷)$$

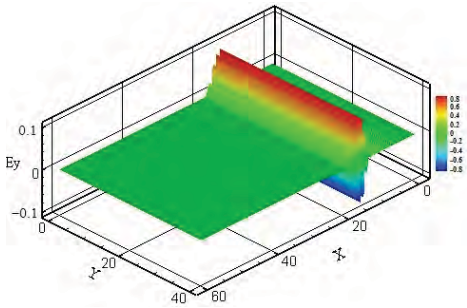
در بخش بعدی نتایج شبیه سازی حاصل از برهم کنش یک لیزر پرتوان و فوق کوتاه با یک پلاسمای رقیق یکنواخت و غیریکنواخت ارائه می‌شود و پدیده شکست موج با گذشت زمان در حضور غیریکنواختی پلاسما نشان داده می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی

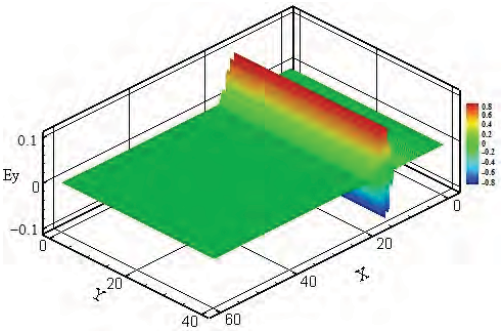
کد شبیه سازی ذره‌ای استفاده شده در این مقاله یک دوبعدی می‌باشد. تمامی پارامترهای استفاده شده در این کد به پارامترهای مشخصه لیزر مانند طول موج و فرکانس لیزری بی‌بعد شده‌اند. پلاسمای در نظر گرفته شده یک پلاسمای رقیق با چگالی $n = 0.03 n_c$ می‌باشد که n_c چگالی بحرانی پلاسما است. ابعاد پلاسمای اولیه بصورت $0 < x < 50$ و $0 < y < 20$ در نظر گرفته شده است. پالس لیزری با با دامنه بدون بعد $a = 1$ و پهنای پالسی از مرتبه فمتو ثانیه که دارای میدان الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب در راستای Y و Z می‌باشد، از روی مرز وارد جعبه شبیه‌سازی می‌شود. با عبور پالس لیزری قوی و فوق کوتاه از پلاسمای رقیق، نیروی پاندرمتیو لیزر، الکترون‌های پلاسما را تحت تأثیر قرار داده و باعث جدایی بار و در نتیجه ایجاد اختلال در چگالی پلاسما می‌شود. این اختلال در چگالی و میدان الکتروستاتیک متناظر با آن در واقع

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

همان موج الکتریکی پلاسما می‌باشد که در راستای انتشار پالس لیزر در پلاسما و پشت آن ایجاد می‌شود. شکل‌های ۱و ۲ عبور پالس لیزر از درون پلاسمای رقیق را در دو زمان بی‌بعد $\tau = 15$ و $\tau = 45$ به ترتیب نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود با توجه به رقیق بودن پلاسمای در نظر گرفته شده، پالس لیزری بدون پراکندگی از درون پلاسما عبور می‌کند.

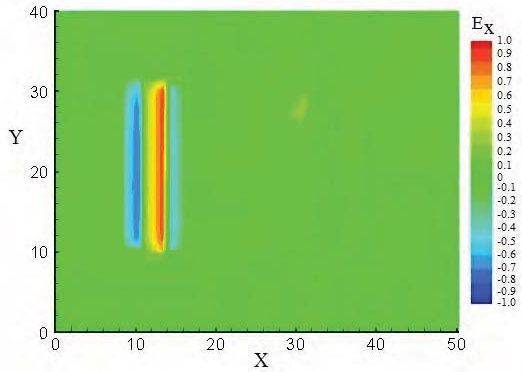


شکل ۱: عبور پالس لیزری از درون پلاسمای رقیق در زمان $\tau = 15$

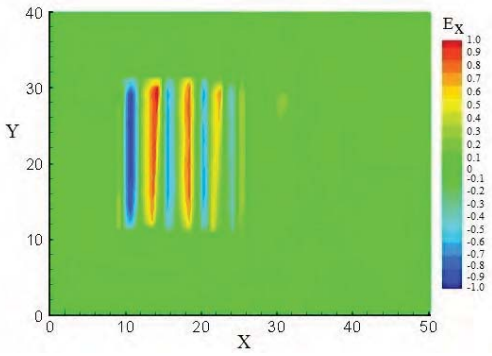


شکل ۲: عبور پالس لیزری از درون پلاسمای رقیق در زمان $\tau = 45$

در شکل‌های ۳ و ۴ شکل‌گیری و انتشار میدان الکتریکی متناظر با موج الکتروستاتیکی ایجاد شده در یک پلاسمای یکنواخت در دو زمان بی‌بعد $\tau = 15$ و $\tau = 45$ نشان داده شده است. با توجه به صفر بودن میدان الکتریکی لیزر در راستای X این میدان تنها مربوط به موج پلاسملایی برانگیخته شده می‌باشد.

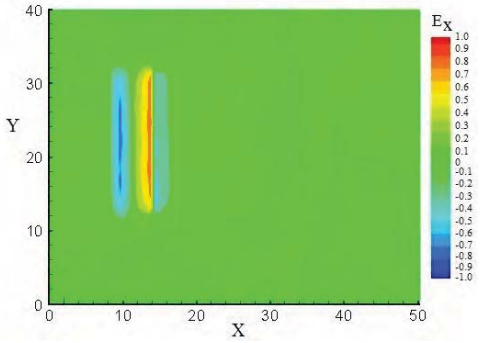


شکل ۳: میدان الکتریکی متناظر با موج طولی ایجاد شده در پلاسمای یکنواخت در زمان $\tau = 15$



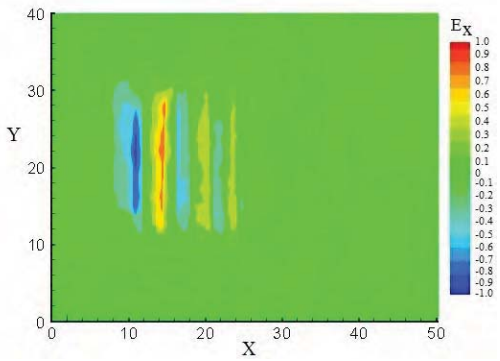
شکل ۴: میدان الکتریکی متناظر با موج طولی ایجاد شده در پلاسمای یکنواخت در زمان $\tau = 45$

برای بررسی تولید و انتشار موج در پلاسمای غیریکنواخت، چگالی اولیه پلاسما را تابعی از مکان ($n = n_0 \sin(k_l x)$) در نظر می‌گیریم. در شکل‌های ۵ و ۶ شکل‌گیری و انتشار میدان الکتریکی متناظر با موج الکتروستاتیکی ایجاد شده در یک پلاسمای غیریکنواخت در دو زمان متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۵: میدان الکتریکی متناظر با موج طولی ایجاد شده در پلاسمای غیریکنواخت در زمان $\tau = 15$.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.



شکل ۶: میدان الکتریکی متناظر پلاسمای غیریکنواخت در زمان $\tau = 45$.

همانگونه که مشاهده می‌شود موج ایجاد شده در پلاسمای غیر یکنواخت با گذشت زمان شکل منظم خود را از دست داده و دچار اعوجاج شده است. بنابراین، در یک پلاسمای رقیق غیریکنواخت پدیده شکست موج سریعتر از یک پلاسمای یکنواخت اتفاق می‌افتد. این نتایج شبیه سازی، نتایج تئوری معتبر اخیر [۹- ۱۰] را به خوبی تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، انتشار پالس لیزری پرشدت و فوق کوتاه در پلاسمای رقیق یکنواخت و غیریکنواخت و پدیده شکست موج برانگیخته شده در پلاسما را با استفاده از یک کد شبیه‌سازی ذره‌ای الکترومغناطیسی دو بعدی مورد بررسی قرار دادیم. با عبور پالس لیزری قوی از پلاسما مدهای جدیدی در راستای انتشار و در پشت پالس لیزری ظاهر می‌شوند که منجر به شکل‌گیری موج پلاسمایی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که در یک پلاسمای غیریکنواخت، در دامنه قبل از دامنه شکست، موج شکل منظم خود را از دست داده و دچار شکست می‌شود.

مرجع‌ها

[1] K. B. Shivamoggi, Introduction to Nonlinear Fluid-Plasma waves, Kluwer, 1988.

[2] C. Maity, N. Chakrabarti, S. Sengupta, Phys. Rev. E. 86, 016408, 2012.

[3] A. Mukherjee, S. Sengupta, Phys. Plasmas 23, 092112, 2016.

[4] A. Kargarian, K. Hajisharifi, H. Mehdian,Phys. Plasmas 23, 082116, 2016.

[5] H. Mehdian, A. Kargarian, K. Hajisharifi, Phys.Plasmas 22, 063102, 2015.

[6] A. Kargarian, M. Rouhani, H. Hakimipajouh One dimension PIC simulation of nonlinear ion-acoustic waves in plasma. IJPR. 2011; 11 (1) :109-116

[7] C.K. Birdsall, and A.B. Langdon, Plasma physics via computer simulation,CRC Press,2004.

[8] R. W. Hockney, and J. W. Eastwood, *Computer simulation using particles*. CRC press, 1988.

[9] M. Karmakar, C.Maity, N. Chakrabarti, S.Sengupta, Phys. Plasmas 25, 022102, 2018.

[10] M. Karmakar, C. Maity, N. Chakrabarti,Phys. Scr **93**, 065601, 2018.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.