

بررسی گرمایش پلاسمای نسبیتی چند یونی با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی پلازما

آمنه کارگریان*

پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی پلازما، به بررسی پدیده شکست موج در پلاسمای چند یونی در سیستم برهم‌کنش لیزر-پلازما پرداخته‌ایم. با عبور پالس لیزری از پلازما، در اثر نیروی پاندرومیتو لیزری، نوسانات الکترونی در پشت پالس لیزری و در راستای طولی برانگیخته می‌شوند. انرژی لیزر از طریق برهم‌کنش ذرات پلازما با این نوسانات، به محیط پلازما انتقال داده می‌شود. با گذشت زمان، نوسانات طولی ایجاد شده در دامنه خود دچار شکست شده و بیش‌ترین انتقال انرژی لیزر به پلازما اتفاق می‌افتد. پلاسمای در نظر گرفته شده در این مقاله شامل الکترون، پوزیترون، و یون سنگین می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش نسبت چگالی یون سنگین به الکترون، زمان شکست موج به تعویق افتاده و موج برانگیخته شده برای مدت زمان طولانی‌تری شکل نوسانی و منظم خود را حفظ می‌کند. این نتایج، در بررسی گرمایش پلازما و انتقال انرژی لیزر به ذرات پلازما حائز اهمیت می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: شکست موج، پلاسمای چند یونی، گرمایش پلازما.

Investigation of excited waves breaking in a multi-ion plasma using 2D PIC simulation

A. Kargarian*

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,
14399-51113, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, using 2D PIC simulation of plasma, the wave-breaking in a multi-ion plasma in the laser-plasma interaction system has been investigated. By propagation of a laser through the plasma, the electron oscillations are excited behind the laser pulse and in longitudinal direction. The laser energy is transferred to the plasma via the interaction of particles with these oscillations. The excited longitudinal oscillations break in their amplitude over time, and the maximum of laser energy is transferred to the plasma. The considered plasma contains electrons, positrons, and heavy ions. The simulation results show that by increasing the ratio of heavy ion to electron density, there is a delay in the wave-breaking phenomenon and the excited wave keeps its oscillating and regular shape for longer time. These results are of crucial importance in the investigation of plasma heating and transfer of laser energy to the plasma particles.

Keywords: Wave breaking, Multi ion plasma, Plasma heating.

Email: akargarian@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

شرح بررسی نوسانات الکترواستاتیک غیرخطی در یک پلاسمای سرد یک موضوع جالب تحقیقی است [۱-۲]. یکی از کاربردهای عمده این مطالعات در تکنیک‌های شتاب ذرات توسط موج برانگیخته‌شده در اثر عبور لیزر یا بیم ذرات پرنرژی از محیط پلازما است که در آن از نوسانات الکترواستاتیک برانگیخته‌شده در پلازما برای شتاب ذرات باردار به انرژی‌های زیاد در فواصل کوتاه استفاده می‌شود [۳]. با این حال، در این تکنیک شتاب، حداکثر شتاب فقط زمانی حاصل می‌شود که دامنه نوسانات الکترواستاتیک زیر یک مقدار بحرانی معروف به دامنه شکست موج نگه داشته شود [۴]. فراتر از دامنه بحرانی نوسانات همدوس شکسته می‌شوند و دامنه میدان شتاب دهنده با تبدیل بخشی از انرژی به انرژی جنبشی تصادفی (گرمایش) ذرات به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد [۵]. در نتیجه، موج دیگر قادر به شتاب ذرات تا انرژی مورد نظر نیست. از نظر فیزیک، فراتر از مدار دامنه بحرانی نوسانگرهای مجاور که موج را تشکیل می‌دهند از یکدیگر عبور می‌کنند و در نتیجه نوسانگرها حرکت همدوس خود را از دست داده و موج دچار شکست می‌شود [۶]. علاوه بر افزایش شدت لیزر و چگالی پلازما، فرآیند فیزیکی دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند منجر به شکست موج نوسانات پلاسمایی شود. این فرآیند به عنوان اختلاط فازی شناخته می‌شود که در صورت بروز وابستگی فضایی فرکانس نوسانات به هر دلیل فیزیکی مانند ناهمگنی پلازما، اثرات تغییر جرم نسبی، میدان مغناطیسی ناهمگن و غیره اتفاق می‌افتد. به دلیل فرکانس وابسته به فضا، نوسانگرهای مجاور به آرامی از فاز همدوس خارج می‌شوند که منجر به شکست موج پس از یک زمان مشخص می‌شود.

در مقاله حاضر، با استفاده از شبیه‌سازی ذره‌ای دو بعدی پلازما به بررسی پدیده شکست موج در یک پلاسمای چند یونی شامل الکترون، پوزیترون، یون سنگین می‌پردازیم. پلاسماهای چندیونی به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در مسائل اختریفیزیکی و کاربردهای آزمایشگاهی مورد توجه اساسی قرار دارند. در این مقاله نشان می‌دهیم که حضور گونه‌های متفاوت یون در پلازما، تأثیرات قابل توجهی بر روی پدیده اختلاط فازی نوسانات برانگیخته‌شده و شکست موج پلاسمایی و در نتیجه انتقال انرژی لیزر به ذرات پلازما دارند. این مسئله در گرمایش محیط پلازما و همچنین شتاب ذرات بسیار حائز اهمیت می‌باشد. این روش گرمایش پلازما به عنوان گرمایش کمکی در گداخت لیزری و همچنین در توکامک‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

۲. شبیه‌سازی ذره‌ای دو بعدی

در این مقاله، از روش شبیه‌سازی ذره‌ای (ذره در جعبه) [۷] برای بررسی پدیده شکست موج در اثر انتشار لیزر در محیط پلاسمای چند یونی استفاده شده است. در این روش چگالی ذرات بر روی شبکه به طریق وزن‌دهی محاسبه می‌شوند. سپس میدان الکتریکی با حل معادله پواسون بر روی نقاط شبکه به دست می‌آید. میدان الکتریکی شبکه از طریق درون‌یابی در محل ذرات محاسبه شده و تحول آن‌ها را موجب می‌شود. از محدودیت‌های اساسی این روش آن است که معمولاً تعداد ذرات به کار رفته در آن‌ها چندین مرتبه کوچکتر از پلاسماهای واقعی است. برای رفع این محدودیت از مفهوم ابرذره استفاده می‌شود. این ذرات دارای جرم و باری چند برابر ذرات واقعی هستند و در حقیقت نماینده چند ذره می‌باشند. در این روش هر ذره مطابق با نیروی لورنتس اعمال شده توسط میدان‌های الکترومغناطیسی در موقعیت ذره حرکت می‌کند و تحول میدان‌ها نیز بر طبق معادلات ماکسول انجام می‌شود [۸]:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}) \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \quad (3)$$

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

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

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

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

در بخش بعدی با استفاده از این روش شبیه‌سازی، پدیده شکست موج با گذشت زمان در یک پلاسمای چند یونی بررسی شده است.

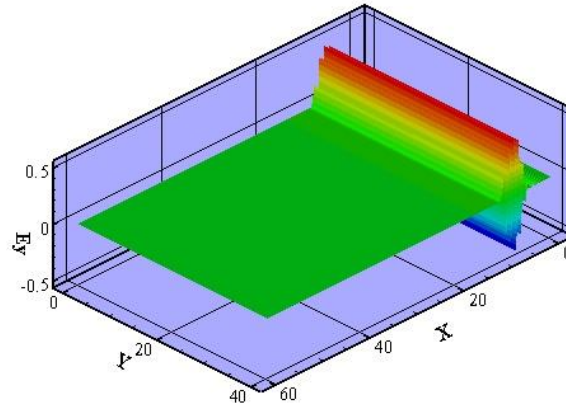
۳. نتایج شبیه‌سازی

برای به دست آوردن نتایج، از کد شبیه‌سازی ذره‌ای دوبعدی استفاده شده است. تمامی پارامترهای استفاده شده در این کد به پارامترهای مشخصه لیزر مانند طول موج و فرکانس لیزری بی‌بعد شده‌اند. پلازما شامل الکترون با چگالی n_e ، پوزیترون با چگالی n_p ، و یون سنگین با چگالی n_i می‌باشد. پالس لیزری 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. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ نشان داده شده است.

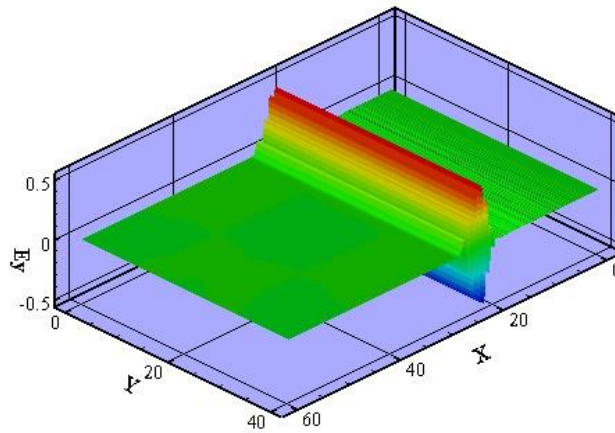
جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

پارامترهای شبیه‌سازی	
$a = 1$	شدت لیزر
$\lambda = 1\mu m$	طول موج لیزر
$\tau = 40fs$	طول پالس لیزر
$n = 0.01n_c$	چگالی پلازما
$0 < x < 60$ $0 < y < 40$	ابعاد جعبه شبیه‌سازی

با عبور پالس لیزری از پلاسمای، مولفه طولی نیروی پاندرمتیو لیزر، الکترون‌های پلازما را تحت تأثیر قرار داده و باعث جدایی بار و در نتیجه ایجاد اختلال در چگالی پلازما می‌شود. این اختلال در چگالی و میدان الکتروستاتیک متناظر با آن در واقع همان موج الکتریکی پلازما می‌باشد که در راستای انتشار پالس لیزر در پلازما و پشت آن ایجاد می‌شود. شکل‌های ۱ و ۲ عبور پالس لیزر در دو زمان $\tau = 10$ و $\tau = 40$ را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با توجه به رقیق بودن پلازما، پالس لیزری بدون پراکندگی از محیط عبور می‌کند.

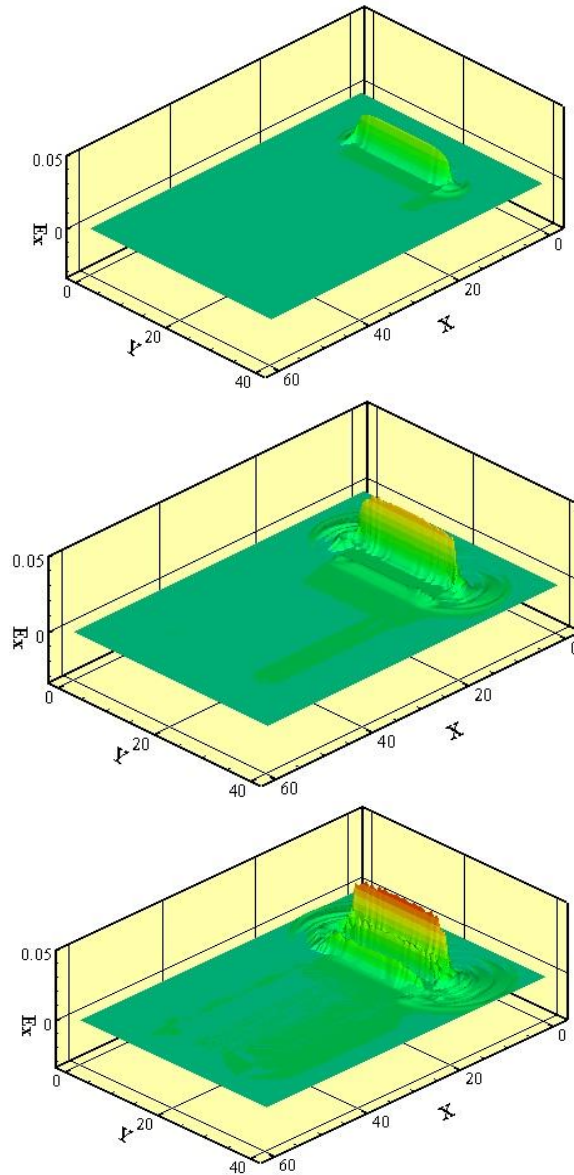


شکل ۱. عبور پالس لیزری از درون پلاسمای رقیق در زمان $\tau = 10$



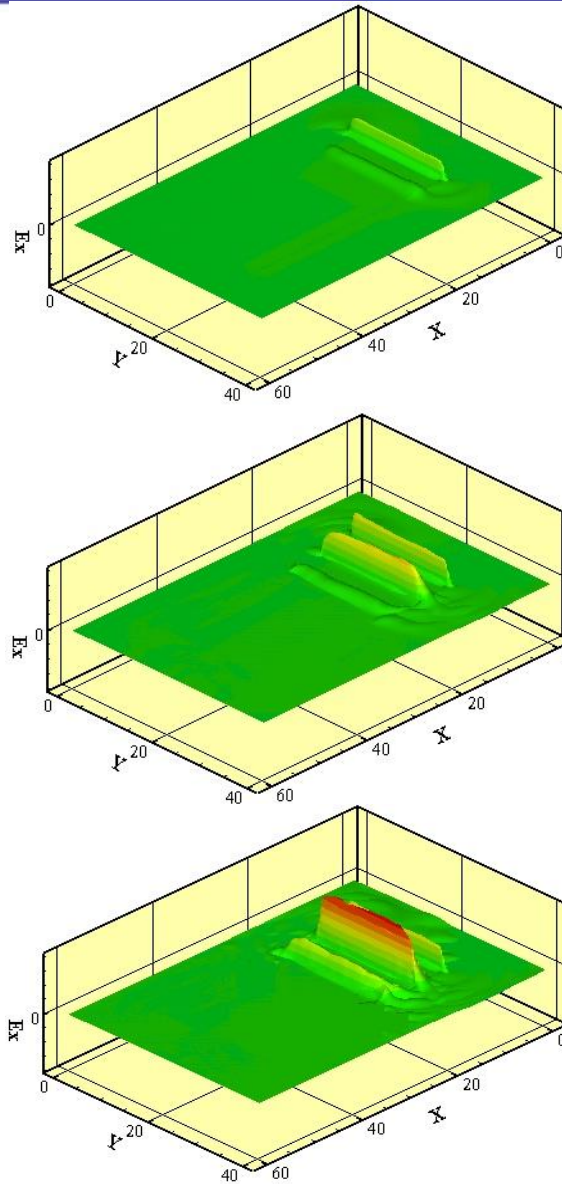
شکل ۲. عبور پالس لیزری از درون پلاسمای رقیق در زمان $\tau = 40$

در شکل ۳ انتشار میدان الکتریکی متناظر با موج الکتروستاتیکی ایجاد شده در یک پلاسمای چند یونی با نسبت چگالی یون سنگین به الکترون برابر با $n_i / n_e = 0.1$ را به ترتیب در سه زمان بی بعد $\tau = 10$ ، $\tau = 20$ ، و $\tau = 30$ نشان داده شده است. با توجه به صفر بودن میدان الکتریکی لیزر در راستای طولی این میدان تنها مربوط به موج پلاسمایی برانگیخته شده می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان موج برانگیخته شده دچار اعوجاج شده و شکل منظم خود را از دست می‌دهد. این پدیده شکست موج می‌باشد.



شکل ۳: انتشار میدان الکتریکی متناظر با موج طولی ایجاد شده در پلاسمای چند یونی با نسبت $n_i/n_e = 0.1$ در سه زمان متفاوت.

برای بررسی نسبت چگالی یون سنگین به الکترون بر روی پدیده شکست موج پلاسمایی در سیستم برهم‌کنش لیزر-پلاسمای، شکل ۴ انتشار میدان الکتریکی متناظر با موج الکتروستاتیکی ایجاد شده در یک پلاسمای چند یونی با نسبت چگالی یون سنگین به الکترون برابر با $n_i/n_e = 0.5$ را به ترتیب در سه زمان بی‌بعد $\tau = 10$ ، $\tau = 20$ ، و $\tau = 30$ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان موج برانگیخته شده شکل منظم خود را حفظ کرده و زمان شکست موج با افزایش نسبت چگالی یون سنگین به الکترون افزایش می‌یابد. این نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج معتبر تئوری بدست آمده از تقریب سیالی را تأیید می‌کنند [۹].



شکل ۴: انتشار میدان الکتریکی متناظر با موج طولی ایجاد شده در پلاسمای چند یونی با نسبت $n_i/n_e = 0.5$ در سه زمان متفاوت.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، انتشار پالس لیزری پرشدت و پدیده شکست موج برانگیخته شده در پلاسمای چند یونی شامل الکترون، پوزیترون، و یون سنگین را با استفاده از یک کد شبیه‌سازی ذره‌ای الکترومغناطیسی دو بعدی مورد بررسی قرار دادیم. با عبور پالس لیزری قوی از پلاسمای چند یونی، 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 چند یونی، با افزایش نسبت چگالی یون سنگین به الکترون، زمان شکست موج به تأخیر افتاده و برای زمان‌های طولانی‌تری موج با حفظ شکل منظم خود در پلازما منتشر شده و با ذرات پلازما تبادل انرژی می‌نماید. نتایج مطالعات در این حوزه، می‌تواند در زمینه گرمایش پلازما حائز اهمیت باشد.

۶. مراجع

1. Brodin, Gert, and Lennart Stenflo. "Nonlinear dynamics of large amplitude modes in a magnetized plasma." *Physics of Plasmas* 21, no. 12 (2014): 122301.
2. Verma, Prabal Singh, and Tapan Chandra Adhyapak. "Nonlinear electrostatic oscillations in a cold magnetized electron-positron plasma." *Physics of Plasmas* 24, no. 11 (2017): 112112.
3. Yadav, Monika, Devki Nandan Gupta, and Suresh C. Sharma. "Electron plasma wave excitation by a q-Gaussian laser beam and subsequent electron acceleration." *Physics of Plasmas* 27, no. 9 (2020): 093106.
4. Akhiezer, A.I. and Polovin, R.V., 1956. Theory of wave motion of an electron plasma. *Soviet Phys. JETP*, 3.
5. Verma, P.S., Sengupta, S. and Kaw, P., 2012. Residual bernstein-greene-kruskal-like waves after one-dimensional electron wave breaking in a cold plasma. *Physical Review E*, 86(1), p.016410.
6. Karmakar, M., Maity, C., Chakrabarti, N. and Sengupta, S., 2018. Phase-mixing of large amplitude electron oscillations in a cold inhomogeneous plasma. *Physics of Plasmas*, 25(2), p.022102.
7. Kargarian, A., M. R. Rouhani, and H. Hakimipajouh. "One dimension PIC simulation of nonlinear ion-acoustic waves in plasma." *Iranian Journal of Physics Research*, 11, no. 1 (2011).
8. C.K. Birdsall, and A.B. Langdon, *Plasma physics via computer simulation*, CRC Press, 2004.
9. Suyun, Z. H. O. U., C. H. E. N. Hui, and L. I. Yanfang. "Breaking of a Langmuir wave in cold electron-positron-ion plasmas." *Plasma Science and Technology* 20, no. 1 (2017): 014008.