بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

تاثیر شکل پالس در رفتار آشوبناک الکترون‌ها در برهمکنش پالس قوی لیزر با پلاسما

الناز خلیل زاده[۱]*، امیر چخماچی[۱]، جمال الدین یزدان پناه[۱]

۱- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

چکیده - در این مقاله تاثیر شکل پالس لیزر در رفتار آشوبناک الکترون ها در برهمکنش پالس قوی با پلاسمای زیرچگال با استفاده از نتایج کد PIC بررسی شده است. نتایج بررسی های ما نشان می دهد که رخ دادن آشوب به شدت وابسته به شرایط اولیه بوده و با کاهش زمان خیزش پالس لیزر از ۶۰ فمتو ثانیه به ۳۰ فمتو ثانیه که همراه با افزایش نیروی پاندرموتیو و نیروی الکتروستاتیکی است رفتار الکترون‌ها کاملا متفاوت می‌باشد. در واقع بر خلاف پالس با زمان خیزش کوتاه، در پالس با زمان خیزش طولانی، دامنه میدان های پراکنده شده در پلاسما می توانند به عنوان موج الکترومغناطیسی دوم عمل کرده و شرایط لازم برای آشوب را فراهم کنند.

کلید واژه- برهمکنش لیزر-پلاسما، رفتار آشوبناک، شبیه سازی ذره‌ای، شکل پالس لیزر

Influence of pulse shape on chaotic behavior of electrons in strong laser pulse interaction with plasma

Elnaz Khalilzadeh[1*], Amir Chakhmachi[1], Jamalaldin Yazdanpanah[1],

[1] Plasma Physics & Fusion Research School, NSRT, Tehran, Iran

Abstract- **In this paper, the effect of the laser pulse shape on the chaotic behavior of electrons in strong laser pulse interaction with under-dense plasma is investigated using the fully kinetic PIC simulations. Our investigations show that occurring the chaos is strongly dependent on the initial conditions and by decreasing the laser pulse rise-time from 60 fs to 30 fs which is accompanied by an increase in the Ponderomotive and the electrostatic forces, the behavior of the electrons is completely different. Indeed, unlike the pulses with quickly rising time, in pulse with long rise-time, the field amplitude of scattered fields in plasma can act as a second electromagnetic wave and provide the necessary condition for the chaos.**

Keywords: Laser-Plasma Interaction, Chaotic Behaviour, Particle-in-Cell Simulation, Laser Pulse Shape

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

۱- مقدمه

پیشرفت‌هایی که امروزه در تولید پالس‌های پر شدت لیزری انجام شده، باعث گردیده تا موضوع برهمکنش لیزر با پلاسما یکی از مسائل اصلی در علم فیزیک شود. در همین زمینه، مساله سازوکار شتاب و انرژی الکترون‌ها به دلیل کاربرد فراوان آن‌ها در حوزه‌های مختلف از جمله گداخت لیزری، مهندسی پزشکی و شتابدهنده‌های پلاسمایی بسیار مورد توجه می‌باشد. در همین زمینه، سازوکارهای مختلف شتابدهی برای الکترون‌ها در نظر گرفته شده که مهمترین آن‌ها شتاب از طریق تشکیل موج دنباله [۱]، شتاب مستقیم [۲] و شتاب بواسطه حرکت آشوبناک الکترون‌ها [۳-۶] می‌باشد. Mendnoca نشان داد هرگاه شرط $a_1 a_2 = 1/16$ برای دامنه‌های بی بعد پتانسیل برداری دو موج الکترومغناطیسی که در خلاف جهت هم حرکت می کنند برقرار باشد حرکت ذره آشوبناک می‌شود [۵]. در تحقیق دیگری نشان داده شده است که در برهمکنش پالس لیزر با پلاسما، هرگاه طول پالس به اندازه کافی بلند باشد میدان‌های پراکنده شده در پلاسما می توانند به عنوان به عنوان پالس دوم عمل کرده و آشوب ایجاد کنند [۶]. با وجود انجام تحقیق‌های مختلف بر روی حرکت آشوبناک الکترون‌ها، هنوز اثر شکل پالس لیزر بررسی نشده است. در این مقاله این مساله بررسی شده و نشان داده می شود با تعییر زمان خیزش پالس لیزر سازوکار شتابدهی الکترون‌ها تغییر می کند.

۲- تئوری مساله

لاگرانژی یک الکترون در محیط پلاسما و در حضور پالس لیزر و در فضای دور از مرز پلاسما به صورت زیر می باشد:

$$L = m_e c^2 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} + \frac{q}{c}(V.\mathrm{A}(\mathrm{x},\mathrm{t})) - q\varphi_w(\mathrm{x},\mathrm{t}), \qquad (۱)$$

که در آن، m_e، c، V، q و φ به ترتیب جرم الکترون، سرعت نور، سرعت الکترون، بار الکتریکی الکترون و پتانسیل الکتروستاتیکی می‌باشند. به عنوان نکته مهم باید گفت که $\boldsymbol{A}(\mathrm{x},\mathrm{t}) = \sum_i \boldsymbol{A}_i(\mathrm{x},\mathrm{t})$ که در آن $\boldsymbol{A}_i(\mathrm{x},\mathrm{t})$ مولفه‌های تابش الکترومغناطیسی شامل پالس اصلی و تمامی میدان‌های پراکنشی تولید شده در پلاسما می‌باشد. هرگاه مشخصات پالس لیزر و پلاسما به گونه‌ای باشد که جمله سوم در مقایسه با جمله دوم دارای مقادیر کوچک باشد در این صورت میدان‌های پراکنشی تولید شده در پلاسما به شرطی که به یک مقدار آستانه مشخص شده که توسط Mendoca [۵] محاسبه شده است برسند می توانند باعث ایجاد آشوب شوند[۳و۶]. حال اگره مشخصات پالس لیزر و پلاسما به گونه‌ای باشند که جمله سوم در رابطه (۱) نسبت به جمله دوم، دارای مقادیر بزرگ باشد مساله فرق خواهد کرد. در این صورت نتایج شبیه‌سازی که در ادامه خواهیم دید نشان می‌دهد که الکترون تحت تاثیر این پتانسیل بوده و آشوب سازوکار قبلی رخ نمی‌دهد. در واقع در این حالت، با افزایش پتانسیل موج، دامنه میدان الکتروستاتیکی تشکیل شده در پلاسما نیز افزایش می‌یابد این افزایش ادامه دارد تا جاییکه شکست موج رخ می‌دهد. با شکسته شدن موج رد پا، پتانسیل موجود در آن نقطه چند مقداره شده و حرکت الکترون کاتوره‌ای می‌شود. اینکه در برهمکنش پالس لیزر با پلاسما کدامیک از این حالتهای بیان شده رخ می دهد به شدت وابسته به شرایط و مشخصات پالس لیزر و پلاسماست. در ادامه ما با استفاده از شبیه سازی PIC نشان خواهیم داد تنها با تغییر زمان خیزش پالس(rise-time) و با ثابت بودن بقیه مشخصات مساله، نوع حرکت و شتابگیری الکترون متفاوت خواهد بود.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

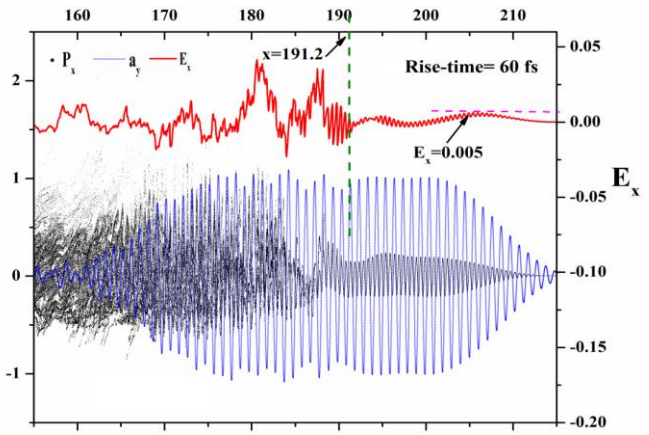
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

۳- شبیه‌سازی مساله و نتایج آن

برای جلوگیری از تکرار شدن پارامترهای شبیه‌سازی در تمام این بخش، این پارامترها قبل از ارائه نتایج شبیه-سازی در اینجا بیان می‌شوند. شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از کد شبیه‌سازی PIC [۷] که تک بعدی در مکان و سه بعدی در سرعت می‌باشد انجام شده است. پالس لیزر دارای طول موج $\lambda=1\mu m$ و شدت $a=1$ a) پتانسیل برداری بی‌بعد می‌باشد.) می‌باشد. شکل پالس لیزر به صورت ذوزنقه‌ای بوده که تابعیت سینوسی دارد. در واقع پالس از سه قسمت خیزش ، مسطح و نزول تشکیل شده است. برای تمامی نتایج شبیه‌سازی، پلاسما با نمایه اولیه پله‌ای و چگالی $n=0.01\ n_{cr}$ در نظر گرفته شده‌اند. برای داشتن وضوح و دقت قابل قبول در شبیه‌سازی، در هر طول موج لیزر، ۲۰۰ سلول شبیه سازی که داخل هرکدام ۶۴ ابر ذره وجود دارد در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱، نمودارهای مربوط به تکانه الکترون‌ها، پتانسیل برداری، میدان الکتریکی و چگالی الکترون‌ها در زمان ۴۸۰ فمتو ثانیه برای پالس S1 با زمان خیزش ۶۰ فمتو ثانیه رسم شده اند. مشخص است که فضای تکانه ذرات پس از مدتی که از انتشار پالس لیزر در پلاسما می گذرد آشوبناک می‌شود. در توضیح اتفاق رخ داده باید گفت: به دلیل اینکه زمان خیزش پالس طولانی می باشد نیروی پاندرموتیو ضعیفی ایجاد می‌شود (نیروی پاندرموتیو با شیب دامنه پالس نسبت مستقیم دارد). در نتیجه دامنه میدان الکتروستاتیک تشکیل شده بواسطه این نیرو ضعیف بوده و سهم جمله سوم در رابطه (۱) ناچیز می‌باشد. در این صورت میدان‌های پراکنشی (جمله دوم رابطه (۱)) می‌توانند نقش مهمی را رخ دادن آشوب بازی کنند. مشخص است که آشوب در $x=191.2\ \mu m$ اتفاق افتاده است. در شکل ۲، نمودارهای مربوط به تکانه الکترون‌ها، پتانسیل برداری، میدان الکتریکی و چگالی الکترون‌ها در زمان ۴۸۰ فمتو ثانیه برای پالس S2 با زمان خیزش ۴۵ فمتو ثانیه رسم شده اند. با دقت به شکل ها مشخص است که با کاهش زمان خیزش پالس که با افزایش نیروی پاندرموتیو همراه است آشوب در مکان $x=196.1\ \mu m$ و سریعتر نسبت به شکل ۱ رخ داده است.

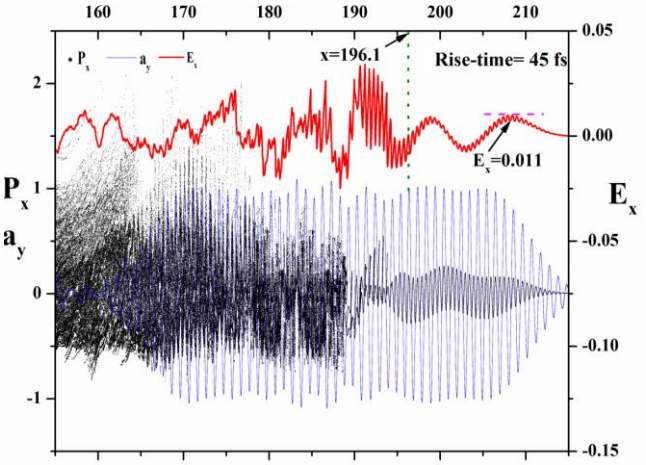
در شکل ۳، نمودارهای مربوط به تکانه الکترون‌ها، پتانسیل برداری، میدان الکتریکی و چگالی الکترون‌ها در زمان ۴۸۰ فمتو ثانیه برای پالس S3 با زمان خیزش ۳۰ فمتو ثانیه رسم شده اند. در توصیف رفتار مشاهده شده برای الکترون‌ها باید گفت که در این حالت به دلیل زمان خیزش کم و تولید نیروی پاندرموتیو قویتر، دامنه میدان الکتروستاتیک مطابق شکل افزایش قابل توجهی می یابد. این دامنه در قسمت ثابت پالس نیز به دلیل مدولاسیون بین تابش اصلی و تابش‌های پراکنده شده رشد می‌یابد. بنابراین جمله سوم در رابطه (۱) غالب بوده و نقش اساسی بازی می کند و الکترون‌ها تحت تاثیر این پتانسیل بوده و هیچ بی‌نظمی در فضای تکانه تا زمانیکه شکست موج در انتهای پالس رخ دهد مشاهده نمی‌شود. به محض شکست



شکل ۱: نمودار فضای فاز، پتانسیل برداری، میدان الکتروستاتیکی، و چگالی الکترون‌ها برای پالس با زمان خیزش ۶۰ فمتو ثانیه در زمان ۴۸۰ فمتو ثانیه

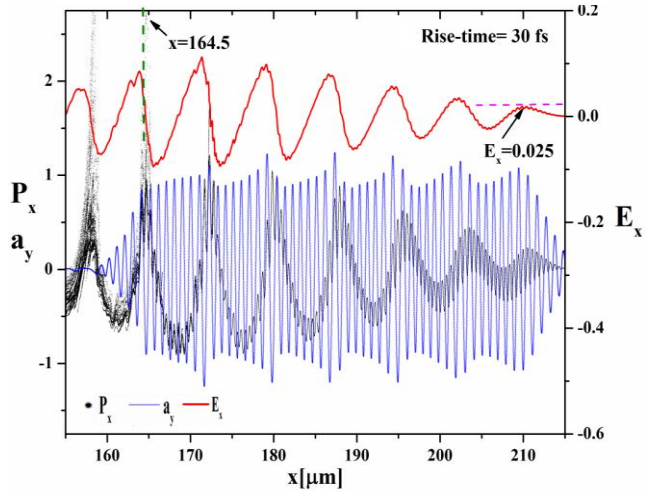
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]



شکل ۲: نمودار فضای فاز، پتانسیل برداری، میدان الکتروستاتیکی، و چگالی الکترون‌ها برای پالس با زمان خیزش ۴۵ فمتو ثانیه در زمان ۴۸۰ فمتو ثانیه

موج ردپا در مکان $x=164.5\ \mu m$ شاهد به هم‌ریختگی در فضای تکانه می‌باشیم. بنابراین آشوب همانند شکل ۱و ۲ رخ نمی دهد. در واقع طبق گزارش کارهای قبلی در مورد حرکت آشوبناک الکترون‌ها [۳و ۶] انتظار می رفت که با کاهش زمان خیزش پالس از ۶۰ فمتوثانیه به ۴۵ و ۳۰ فمتو ثانیه، نیروی پاندرموتیو افزایش یافته و آشوب سریعتر رخ دهد. این در حالیست که نتایج شبیه سازی ما نشان می دهد که این اتفاق برای کاهش از ۶۰ به ۴۵



شکل ۳: نمودار فضای فاز، پتانسیل برداری، میدان الکتروستاتیکی، و چگالی الکترون‌ها برای پالس با زمان خیزش ۳۰ فمتو ثانیه در زمان ۴۸۰ فمتو ثانیه

فمتو ثانیه صحیح هست ولی با کاهش بیشتر که همراه با افزایش بیشتر دامنه موج ردپا در ۳۰ فمتو ثانیه است شاهد رخ دادن آشوب نیستیم. بنابراین نتایج شبیه‌سازی ما نشان می‌دهد نمی توان براحتی راجع به پارامترهای پالس لیزر و پلاسما برای رخ دادن آشوب صحبت نمود. در واقع می توان گفت آشوب و رفتار آشوبناک الکترون‌ها می تواند با تغییر کوچکترین مشخصات پالس لیزر تغییر کند.

۴- نتیجه‌گیری

همانطور که گفته شد آشوبناک شدن الکترون‌ها یکی از سازوکارهای شتابدهی می‌باشد. در این مقاله نشان داده شد که این مساله تا چه حد به شکل پالس لیزر وابسته است. ما نشان دادیم که تنها با تغییر زمان خیزش ابتدایی پالس لیزر و ثابت ماندن بقیه مشخصات پلاسما و پالس لیزر، شاهد رفتارهای بسیار متفاوت در سازوکار شتابدهی الکترون‌ها هستیم. در واقع با کاهش زمان خیزش از ۶۰ فمتو ثانیه به ۳۰ فمتو ثانیه که همراه با افزایش نیروی پاندرموتیو و به دنبال آن افزایش نیروی الکتروستاتیکی است، رفتار الکترون‌ها و نوع سازوکار شتابدهی کاملا متفاوت می‌باشد.

۵- مرجع‌ها

[1] D. Gustas, D. Guénot, A. Vernier, S. Dutt, F. Böhle, R. Lopez-Martens, A. Lifschitz, and J. Faure, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 013401(2018).
[2] H. Ghotra, D. Jaroszynski, B. Ersfeld, N. Singh Saini, S. Yoffe and N. Kant, LPB 36, 154 (2018).
[3] Z. M. Sheng, K. Mima, Y. Sentoku, M. S. Jovanovic, T. Taguchi, J. Zhang and J. Meyer-ter-Vehn, *Phys. Rev. Lett.* 88, 055004 (2002).
[4] G.R. Smith and A.N. Kaufman, Phys. Rev. Lett. 34, 1613 (1975).
[5] J. T. Mendonca and F. Doveil, *J. Plasma Phys.* 28, 485 (1982).
[6] E.Khalilzadeh, J.Yazdanpanah, J. Jahanpanah, A.Chakhmachi, and E.Yazdani, *Phys. Plasmas* 22, 113115 (2015).
[7] J. Yazdanpanah and A. Anvary, *Phys. Plasmas* 19, 033110 (2012).

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]