

رسالة محمد



دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک اتمی مولکولی

موضوع:

اثر تغییر شکل پالس چرپ شده بر میدان عقبه لیزری

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر سعید میرزائزاد

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر فرشاد صحبت زاده

نام دانشجو:

ربابه آزاديفر

بهار ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

## سپاسگزاری

رسول خدا فرمودند:

« مَنْ عَلَّمَنِي حَرْفًا فَقَدْ سَيَّرَنِي عَبْدًا »

برخود لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند استادان گرامی جناب آقای دکتر سعید میرزائزاد و جناب آقای دکتر فرشاد صحبت‌زاده تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر مهدی عصری در طول این پروژه کمال تشکر را دارم. در پایان از همسر عزیزم جناب آقای طه کوه‌رخی بخاطر همه خوبی‌ها و مهربانی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغش که در تمام این مدت حامی و پشتیبان من بوده است تشکر ویژه دارم.

## چکیده:

روش‌های متفاوتی برای شتابدهی الکترون در پلاسمای رقیق پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، شتابدهی از طریق ایجاد میدان عقبه لیزری می‌باشد. در این روش یک پالس کوتاه با فرکانسی بزرگتر از فرکانس پلازما باعث ایجاد نوسانات پلاسمایی در عقب پالس می‌شود که به نوسانات پلازما در این حالت میدان عقبه می‌گویند. یکی از کاربردهای مهم میدان‌های عقبه لیزری شتاب الکترون‌ها یا یون‌ها با گرادیان شتاب بالا است. این پروژه به دنبال روشی برای تقویت میدان عقبه در برهمکنش غیرخطی پالس کوتاه لیزری با پلازما یکنواخت در یک بُعد می‌باشد. مدلی که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است بر مبنای معادلات سیالی نسبیته پلاسمای سرد و معادلات ماکسول است. پالس لیزری از ابتدا بصورت یک پالس چرپ شده خطی با فرکانس  $\omega(\xi) = \omega_0 + b(\xi - \xi_0)$  در نظر گرفته شده است که  $b$  پارامتر چرپ می‌باشد. با اصلاح شکل معادلات حاکم بر تحول پالس و میدان عقبه بصورت تحلیلی، تأثیر همزمان چرپ شدگی و تغییر شکل پالس بر دامنه میدان عقبه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در این پروژه نشان می‌دهند که دامنه میدان عقبه برای پالسی با چرپ شدگی مناسب بطور قابل توجهی رشد خواهد کرد. به طور مثال برای پلاسمایی با چگالی  $n_p = 1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  که معادل با طول موج پلاسمای  $\lambda_p = 80 \mu\text{m}$  است و یک پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ، طول موج  $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$  ( $\omega_0/\omega_p = 100$ )، پارامتر چرپ  $b = 6$  و طول پالس  $\sigma_z/\lambda_p = 0.795$ ، در زمان  $t = 90 \tau_p$  دامنه پتانسیل میدان عقبه به  $e\phi/m_0 c^2 = 3.2$  رسیده است. در حالیکه این مقدار برای پالس غیر چرپ، بدون در نظر گرفتن اثر تغییر شکل پالس  $e\phi/m_0 c^2 = 0.9$  بدست می‌آید. همچنین نتایج مؤید آن است که دامنه میدان عقبه نسبت به حالتی که اثر تغییر شکل پالس در نظر گرفته نشده باشد، بطور قابل ملاحظه‌ای رشد می‌کند.

## واژه‌های کلیدی:

میدان عقبه لیزری، پالس لیزری با فرکانس متغیر (چرپ)، چرپ‌شدگی خطی، تغییر شکل پالس، تفاضلات محدود صریح

## مقالات استخراج شده از این رساله

- ۱- مقاله ارائه شده با عنوان "تأثیر همزمان چرپ‌شدگی و تغییر شکل پالس بر دامنه میدان عقبه لیزری" بصورت پوستر در کنفرانس فیزیک ایران، ۲۰ تا ۲۳ شهریور ماه ۱۳۸۹ در دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- ۲- مقاله ارائه شده با عنوان "تأثیر چرپ‌شدگی پالس بر دامنه میدان عقبه لیزری" بصورت پوستر در کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۹ تا ۲۱ بهمن ماه ۱۳۸۹ در مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی کرمان.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول - مقدمه و مفاهیم برهمکنش لیزر پلاسما	۱
(۱-۱) مقدمه	۱
(۲-۱) مفاهیم برهمکنش لیزر پلاسما	۴
(۱-۲-۱) انتشار لیزر در پلاسما	۴
(۲-۲-۱) نیروی محرکه	۶
(۳-۲-۱) برهمکنش لیزر با پلاسمای کم چگال	۷
(۴-۲-۱) پدیده شکست موج	۸
(۳-۱) روش‌های شتاب لیزری	۹
(۱-۳-۱) شتابدهنده‌ها در محیط خلاء	۹
(۲-۳-۱) شتابدهنده‌ها در محیط پلاسما	۱۰
(۱-۲-۳-۱) شتابدهنده موج زنجری پلاسمایی	۱۲
(۲-۲-۳-۱) شتابدهنده میدان عقبه لیزری	۱۳
(۳-۲-۳-۱) شتابدهنده خود مدولاسیون میدان عقبه لیزری	۱۴
(۴-۲-۳-۱) شتابدهنده میدان عقبه ذره‌ای	۱۶
(۵-۲-۳-۱) رژیم حبایی	۱۷
(۴-۱) تولید پالس‌های لیزری با روش CPA	۱۸
(۱-۴-۱) تولید پالس فمتو ثانیه اولیه	۲۱
(۲-۴-۱) کش‌آوری پالس	۲۱
(۱-۲-۴-۱) توری پراش	۲۳
(۲-۲-۴-۱) منشورها	۲۳
(۳-۲-۴-۱) ترکیب توری‌ها، عدسی‌ها، منشورها و آینه‌ها	۲۵

- ۲۷ ..... تقویت (۳-۴-۱) .....
- ۲۸ ..... روش باز تولید (۱-۳-۴-۱) .....
- ۲۹ ..... روش مسیرهای چندگانه (۲-۳-۴-۱) .....
- ۳۰ ..... فشرده ساز (۴-۴-۱) .....
- ۳۲ ..... تولید پالس فرکانس متغیر (۵-۱) .....
- ۳۲ ..... تغییر در وضعیت فشرده ساز (۱-۵-۱) .....
- ۳۳ ..... استفاده از کانال پلاسمایی (۲-۵-۱) .....

### فصل دوم- تولید میدان عقبه یک بُعدی غیرخطی توسط پالس لیزر چرپ شده ..... ۳۵

- ۳۵ ..... مقدمه (۱-۲) .....
- ۳۶ ..... معادلات حاکم بر میدان عقبه یک بُعدی غیرخطی (۲-۲) .....
- ۴۱ ..... حل عددی معادله میدان عقبه (۳-۲) .....
- ۴۱ ..... بی بُعدسازی معادله (۱-۳-۲) .....
- ۴۲ ..... چرپ خطی (۲-۳-۲) .....
- ۴۸ ..... چرپ گاوسی (۳-۳-۲) .....

### فصل سوم- اثر تغییر شکل پالس لیزری بر تولید میدان عقبه یک بُعدی ..... ۵۶

- ۵۶ ..... مقدمه (۱-۳) .....
- ۵۷ ..... معادله موج پالس لیزری در پلاسما (۲-۳) .....
- ۵۹ ..... حل عددی معادلات (۳-۳) .....
- ۶۰ ..... بی بُعدسازی معادلات (۱-۳-۳) .....
- ۶۲ ..... بررسی نتایج عددی (۴-۳) .....
- ۶۲ ..... پالس غیر چرپ (۱-۴-۳) .....



فصل چهارم- اثر همزمان تغییر شکل و چرپ‌شدگی پالس لیزری بر تولید میدان عقبه .....	۷۰
۴-۱) مقدمه .....	۷۰
۴-۲) معادله موج پالس لیزری چرپ‌شده خطی در محیط پلاسما .....	۷۱
۴-۲-۱) حل تحلیلی معادلات .....	۷۳
۴-۳) حل عددی معادلات .....	۷۶
۴-۳-۱) بی‌بعد سازی معادلات .....	۷۷
۴-۴) بررسی نتایج عددی .....	۸۰
۴-۵) نتیجه گیری و پیشنهادات .....	۹۰
پیوست الف): روش تفاضلات محدود در حل عددی معادلات فصل سوم .....	۹۲
پیوست ب): روش تفاضلات محدود در حل عددی معادلات فصل چهارم .....	۹۵
پیوست ج): برنامه‌های استفاده شده در این تحقیق به زبان فرترن ۹۰ .....	۹۸
منابع و ماخذ .....	۱۰۹
چکیده انگلیسی .....	۱۱۲

## فهرست شکل‌ها

شماره شکل	صفحه
شکل (۱-۱): سرعت فاز بی‌بُعد $v_{ph}/c$ و سرعت گروه بی‌بُعد $v_g/c$ بر حسب تابعی از $n_e/n_0$ .....	۵
شکل (۲-۱): نمایه‌ای از نیروی محرکه یک پالس لیزری با مشخصه گاوسی.....	۷
شکل (۳-۱): نمایه ورود پالس لیزر به داخل پلاسما و تولید میدان‌های الکتریکی طولی.....	۸
شکل (۴-۱): نمایه‌ای از یک شتاب‌دهنده موج ضربانی پلاسمایی.....	۱۲
شکل (۵-۱): نمایه‌ای از میدان عقبه تولید شده توسط پالس لیزری، الکترون‌ها می‌توانند در این میدان‌ها گیر افتاده و شتاب بگیرند.....	۱۳
شکل (۶-۱): نمایه‌ای از میدان عقبه تولید شده توسط مدولاسیون پالس لیزری، الکترون‌ها می‌توانند در این میدان‌ها گیر افتاده و شتاب بگیرند.....	۱۵
شکل (۷-۱): نمایه‌ای از اصول شتاب‌دهنده میدان عقبه ذره‌ای.....	۱۶
شکل (۸-۱): نمایه‌ای از اصول شتاب در رژیم حبایی.....	۱۸
شکل (۹-۱): تغییرات شدت لیزر در سالهای مختلف.....	۱۹
شکل (۱۰-۱): نمایه‌ای از اصول روش CPA.....	۲۰
شکل (۱۱-۱): نوسانگر روش قفل‌شدگی مد برای تولید پالس فمتو ثانیه.....	۲۱
شکل (۱۲-۱ الف): پالس با تغییر فرکانس افزایشی و میدان الکتریکی مربوط به آن.....	۲۲
شکل (۱۲-۱ ب): پالس با تغییر فرکانس کاهشی و میدان الکتریکی مربوط به آن.....	۲۲
شکل (۱۳-۱): نمایه کش‌آوری پالس با استفاده از دو توری پراش، پالس خروجی فرکانس متغیر کاهشی است.....	۲۳
شکل (۱۴-۱ الف): نمایه کش‌آوری پالس با استفاده از دو منشور، پالس خروجی فرکانس متغیر کاهشی است.....	۲۴
شکل (۱۴-۱ ب): نمایه کش‌آوری پالس با استفاده از چهار منشور، پالس خروجی فرکانس متغیر کاهشی است.....	۲۴
شکل (۱۵-۱): نمایه کش‌آوری پالس با استفاده از دو توری، دو عدسی و یک آینه تمام بازتاب، پالس خروجی پاشندگی مثبت دارد.....	۲۵

- شکل (۱۶-۱): نمایه کش آوری پالس با استفاده از دو توری، دو عدسی و یک آینه تمام بازتاب. ۲۶.....
- شکل (۱۷-۱): نمایه کش آوری پالس با استفاده از یک توری، یک آینه تخت و یک آینه خمیده، پالس خروجی تغییر فرکانس افزایشی دارد. ۲۶.....
- شکل (۱۸-۱): نمایه کش آوری پالس توسط آینه‌های پاشنده، پالس خروجی تغییر فرکانس کاهشی دارد. ۲۷.....
- شکل (۱۹-۱): نمایه‌ای از تقویت پالس با روش باز تولید. ۲۸.....
- شکل (۲۰-۱): تقویت پالس با روش مسیرهای چندگانه با استفاده از دو آینه خمیده، یک آینه تخت، دو قطبشگر و یک سلول پاکلز. ۲۹.....
- شکل (۲۱-۱): تقویت پالس بر اساس روش مسیرهای چندگانه با استفاده از چهار آینه خمیده. ۲۹.....
- شکل (۲۲-۱): نمایه فشرده‌سازی پالس را با استفاده از دو توری و یک آینه تمام بازتاب. ۳۱.....
- شکل (۲۳-۱): نمایه‌ای از قسمت‌های مختلف روش CPA. ۳۱.....
- شکل (۲۴-۱): جدایی نسبی فشرده ساز که می‌تواند منجر به تولید پالس با تغییر فرکانس مثبت و منفی شود. ۳۲.....
- شکل (۱-۲): دامنه میدان الکتریکی بی‌بعد شده پالس لیزری با  $\sqrt{8}$ ،  $\sigma_z/\lambda_p \approx 0.795$ ،  $\sigma_x/\lambda_p = -6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$ . ۴۳.....
- شکل (۲-۲): پتانسیل برداری بی‌بعد شده پالس لیزری با  $\sqrt{8}$ ،  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z/\lambda_p \approx 0.795$ ،  $\sigma_x/\lambda_p = -6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$ . ۴۴.....
- شکل (۲-۳-الف): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بعد شده برای پالس لیزری با  $\sqrt{8}$ ،  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_1 = 0.795\lambda_p$ ،  $\sigma_x/\lambda_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$ . خط قرمز رنگ  $b\lambda_p/\omega_p = 0$  و خط آبی رنگ  $b\lambda_p/\omega_p = 6$ . ۴۵.....
- شکل (۲-۳-ب): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بعد شده برای پالس لیزری با  $\sqrt{8}$ ،  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_1 = 0.795\lambda_p$ ،  $\sigma_x/\lambda_p = -6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$ . خط قرمز رنگ  $b\lambda_p/\omega_p = 0$  و خط آبی رنگ  $b\lambda_p/\omega_p = -6$ . ۴۵.....
- شکل (۴-۲): دامنه پتانسیل بی‌بعد شده میدان عقبه بر حسب پارامترهای چرپ خطی بی‌بعد شده. ۴۶.....
- شکل (۵-۲): دامنه پتانسیل بی‌بعد شده میدان عقبه بر حسب طول بی‌بعد شده پالس لیزری. ۴۷.....
- شکل (۶-۲): دامنه میدان الکتریکی بی‌بعد شده میدان عقبه برای پالسی با  $\sqrt{8}$ ،  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_1 = 0.795\lambda_p$ ،  $\sigma_x/\lambda_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$ . خط قرمز رنگ  $b\lambda_p/\omega_p = 0$  و خط آبی رنگ  $b\lambda_p/\omega_p = 6$ . ۴۸.....

شکل (۷-۲) : میدان الکتریکی بی‌بُعد شده پالس با  $\tilde{E}_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.795$ ،  $\Delta_\omega / \omega_p = -6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب

..... $\xi / \lambda_p$  ۴۹

شکل (۸-۲) : پتانسیل بُرداری بی‌بُعد شده پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.795$ ،  $\Delta_\omega / \omega_p = -6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب

..... $\xi / \lambda_p$  ۵۰

شکل (۹-۲) : دامنه پتانسیل بی‌بُعد شده میدان عقبه بر حسب پارامترهای چرپ گاوسی بی‌بُعد شده..... ۵۱

شکل (۱۰-۲) : دامنه پتانسیل بی‌بُعد شده میدان عقبه بر حسب طول بی‌بُعد شده پالس لیزری..... ۵۲

شکل (۱۱-۲) : دامنه پتانسیل بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.795$ ،  $\Delta_\omega / \omega_p = 8$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حسب  $\xi / \lambda_p$ ، خط قرمز رنگ  $\Delta_\omega / \omega_p = 0$  و خط آبی رنگ  $\Delta_\omega / \omega_p = 8$ ..... ۵۲

شکل (۱۲-۲) : دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.795$ ،  $\Delta_\omega / \omega_p = -8$  و

$\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi / \lambda_p$ ، خط قرمز رنگ  $\Delta_\omega / \omega_p = 0$  و خط آبی رنگ  $\Delta_\omega / \omega_p = -8$ ..... ۵۳

شکل (۱۳-۲) : دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.25$ ،  $\Delta_\omega / \omega_p = -8$  و

$\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi / \lambda_p$ ، خط قرمز رنگ  $\Delta_\omega / \omega_p = 0$  و خط آبی رنگ  $\Delta_\omega / \omega_p = -8$ ..... ۵۴

شکل (۱-۳) : دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده پالس لیزری غیر چرپ با  $\tilde{E}_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.795$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب

..... $\xi / \lambda_p$  ۶۳

شکل (۲-۳) : پتانسیل بُرداری بی‌بُعد شده پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z / \lambda_p \approx 0.795$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب

..... $\xi / \lambda_p$  ۶۳

شکل (۳-۳-الف) : دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حسب  $\xi / \lambda_p$  در زمان  $t = 1\tau_p$ ..... ۶۵

شکل (۳-۳-ب) : دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حسب  $\xi / \lambda_p$  در زمان  $t = 30\tau_p$ ..... ۶۵

شکل (۳-۳-ج) : دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حسب  $\xi / \lambda_p$  در زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۶۶

شکل (۳-۳-د): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حساب  $\xi/\lambda_p$ . خط مشکی در زمان  $t = 1\tau_p$ ، خط قرمز رنگ در زمان  $t = 30\tau_p$  و خط آبی رنگ در زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۶۶

شکل (۳-۴-الف): دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و

$\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 1\tau_p$ ..... ۶۷

شکل (۳-۴-ب): دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و

$\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 30\tau_p$ ..... ۶۸

شکل (۳-۴-ج): دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالس لیزری غیر چرپ با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و

$\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۶۸

شکل (۴-۱-الف): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$ ،  $b\lambda_p/\omega_p = 6$  و

$\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 5\tau_p$ ..... ۸۰

شکل (۴-۱-ب): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$ ،  $b\lambda_p/\omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$

بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 30\tau_p$ ..... ۸۱

شکل (۴-۱-ج): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$ ،  $b\lambda_p/\omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$

بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 85\tau_p$ ..... ۸۱

شکل (۴-۱-د): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$ ،  $b\lambda_p/\omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حساب  $\xi/\lambda_p$ . خط مشکی در زمان  $t = 5\tau_p$ ، خط قرمز رنگ در زمان  $t = 30\tau_p$  و خط آبی رنگ در زمان  $t = 85\tau_p$ ..... ۸۲

شکل (۴-۲-الف): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$ ،  $b\lambda_p/\omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$

بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۸۳

شکل (۴-۲-ب): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$ ،  $b\lambda_p/\omega_p = -6$  و  $\xi_0 = -3$

بر حسب  $\xi/\lambda_p$  در زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۸۳

شکل (۴-۲-ج): دامنه پتانسیل میدان عقبه بی‌بُعد شده برای پالس لیزری با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.795\lambda_p$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi/\lambda_p$ ،

در زمان  $t = 90\tau_p$ . خط مشکی برای پارامتر چرپ  $b\lambda_p/\omega_p = 0$ ، خط قرمز برای پارامتر چرپ  $b\lambda_p/\omega_p = -6$  و خط آبی برای

پارامتر چرپ  $b\lambda_p/\omega_p = 6$ ..... ۸۴

شکل (۳-۴): دامنه پتانسیل بی‌بُعد شده میدان عقبه بر حسب پارامترهای چرپ خطی بی‌بُعد شده..... ۸۵

شکل (۴-۴): دامنه پتانسیل بی‌بُعد شده میدان عقبه بر حسب طول بی‌بُعد شده پالس لیزری..... ۸۶

شکل (۴-۵-الف): دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.6\lambda_p$ ،  $b\lambda_p / \omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$

بر حسب  $\xi / \lambda_p$  در زمان  $t = 0$ ..... ۸۷

شکل (۴-۵-ب): دامنه میدان الکتریکی بی‌بُعد شده میدان عقبه برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.6\lambda_p$ ،  $b\lambda_p / \omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$  بر

حسب  $\xi / \lambda_p$  در زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۸۷

شکل (۴-۶-الف): آشفتگی چگالی پلاسما برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.6\lambda_p$ ،  $b\lambda_p / \omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi / \lambda_p$  در

زمان  $t = 5\tau_p$ ..... ۸۸

شکل (۴-۶-ب): آشفتگی چگالی پلاسما برای پالسی با  $a_0 = \sqrt{8}$ ،  $\sigma_z = 0.6\lambda_p$ ،  $b\lambda_p / \omega_p = 6$  و  $\xi_0 = -3$  بر حسب  $\xi / \lambda_p$  در

زمان  $t = 90\tau_p$ ..... ۸۹

## فهرست علائم و اختصارات

<b>CPA</b>	Chirp Pulse Amplification	تفویت پالس فرکانس متغیر
<b>PBWA</b>	Plasma beat wave accelerator	شتابدهنده موج ضربانی پلاسمایی
<b>LWFA</b>	Laser wake field accelerator	شتابدهنده میدان عقبه لیزری
<b>SMLWFA</b>	Self modulation laser wake field accelerator	شتابدهنده خودمدولاسیون میدان عقبه لیزری
<b>PWFA</b>	Particle wake field accelerator	شتابدهنده میدان عقبه ذره‌ای
<b>PIC</b>	Particle in cell	ذره در سلول (روش شبیه‌سازی)

## فصل اول

مقدمه و مفاهیم برهمکنش لیزر پلاسما



## فصل اول : مقدمه و مفاهیم برهمکنش لیزر پلاسما

### ۱-۱ مقدمه

شتابدهنده‌های ذرات با ایجاد ذرات پر انرژی از دیرباز نقش مهمی در پیشرفت صنعت، پزشکی و دیگر مقوله‌های زندگی انسان‌ها ایفا کرده‌اند. با ورود لیزر به عرصه علم و تکنولوژی و دستیابی به لیزرهای پُرشدت، نسل جدیدی از شتابدهنده‌ها به وجود آمدند و شتابدهنده‌های لیزری به عنوان سیستم‌های ارزان‌تر و فشرده‌تر پیشنهاد شدند. نوع خاصی از شتابدهنده‌های لیزری، شتابدهنده‌ها در محیط پلاسما می‌باشند که از پلاسما به عنوان محیطی برای شتاب الکترون‌ها استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر شتابدهنده‌های پلاسمایی بدلیل توانایی تحمل گرادیان شتاب بسیار بالا و کوتاه بودن فاصله شتابدهی، رشد قابل توجهی کرده‌اند. در شتابدهنده‌های کلاسیک از میدان‌های الکتریکی که به یکی از روش‌های الکترواستاتیکی، القایی یا رادیوفرکانسی تولید شده‌اند، بطور مستقیم برای شتابدهی ذرات استفاده می‌کنند. بدلیل جنس و ساختمان این شتابدهنده‌ها بیشترین اندازه میدان الکتریکی که می‌توان در

آنها تولید و برای شتابدهی استفاده کرد به  $100 \text{ MV/m}$  محدود می‌شود که ناشی از تخلیه الکتریکی روی دیواره‌های فلزی می‌باشد [۱]. در حالیکه در شتابدهنده‌های پلاسمایی با انتخاب مناسب چگالی پلاسما می‌توان میدان‌هایی از مرتبه  $100 \text{ GV/m}$  نیز تولید کرد.

روش‌های زیادی جهت تولید امواج پلاسما و شتاب الکترون در پلاسما پیشنهاد شده است که یکی از موفق‌ترین آنها تولید امواج در پلاسما بوسیله پالس لیزری<sup>۱</sup> است. استفاده از میدان‌های الکتریکی طولی پلاسما جهت شتابدهی اولین بار توسط Dawson و Tajima در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد شد [۲]. با ابداع روش CPA<sup>۲</sup> توسط Strickland و Mourou در سال ۱۹۸۵ [۳] و تولید پالس‌های لیزری کوتاه پُرشدت ( $\tau \leq 1 \text{ ps}$ ,  $I \geq 10^{18} \text{ W/cm}^2$ ) بکارگیری این روش برای شتابدهی الکترون‌ها به واقعیت نزدیک شده است.

در این روش یک پالس کوتاه لیزری با طولی از مرتبه طول موج پلاسما وارد محیط پلاسما می‌شود. نیروی محرکه<sup>۳</sup> حاصل از پالس لیزری الکترون‌ها را به علت جرم کمتر از ناحیه پُرشدت دور می‌کند، به دلیل جدایی بین بارهای مثبت و منفی و اختلاف پتانسیل بین آنها یک میدان الکتریکی طولی، به نام میدان عقبه<sup>۴</sup> در پشت پالس تولید می‌شود که با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت کرده و می‌تواند باعث شتاب ذرات باردار گردد. در آزمایش‌های اولیه در سال ۲۰۰۲ با این روش بسته‌های الکترونی با انرژی بالاتر از  $200 \text{ MeV}$  و پهن‌شدگی زیاد تولید شدند [۴]، اما در سال ۲۰۰۴ محققین با این روش موفق شدند بسته‌های الکترونی با انرژی‌های بالاتر و پهن‌شدگی کم تولید کنند [۵و۶].

در بررسی‌های انجام شده در سال ۲۰۰۵، محققین اثر تغییر فرکانس پالس لیزری را در برهمکنش خطی با پلاسما مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند تغییر فرکانس پالس، تأثیر مثبتی در افزایش دامنه میدان عقبه

<sup>1</sup> Laser Wake-Field Generation

<sup>2</sup> Chirp Pulse Amplification

<sup>3</sup> Ponderomotive force

<sup>4</sup> Wake-Field

دارد [۷]. همچنین در بررسی‌های اخیر انجام شده محققین نشان داده‌اند که در برهمکنش غیر خطی پالس لیزر چرپ شده با پلاسما بدون در نظر گرفتن تغییر شکل پالس، می‌توان دامنه میدان عقبه را تا چندین مرتبه تقویت کرد [۸-۹]. موضوع مورد بحث در این پایان‌نامه بررسی اثرات تغییر فرکانس (چرپ‌شدگی) و تغییر شکل پالس لیزری بر روی میدان عقبه تولید شده در پلاسما می‌باشد، که در فصل‌های زیر دسته‌بندی شده است.

فصل اول: در این فصل مفاهیم برهمکنش لیزر پلاسما، روش‌های شتاب الکترون و روش‌های تولید پالس‌های پُرشدت با فرکانس متغیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل دوم: تولید میدان عقبه یک‌بُعدی در رژیم غیرخطی برای پالس لیزر چرپ‌شده با ثابت فرض کردن شکل پالس لیزری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل سوم: اثر تغییر شکل پالس لیزری بر تولید میدان عقبه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل چهارم: با اصلاح معادلات حاکم بر تولید میدان عقبه غیرخطی، اثر همزمان تغییر شکل و چرپ شدگی پالس لیزری بر تولید میدان عقبه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱) مفاهیم برهمکنش لیزر پلاسما

### ۱-۲-۱) انتشار لیزر در پلاسما

انتشار یک موج الکترومغناطیسی در پلاسما بوسیله رابطه پاشندگی پلاسما توصیف می‌شود [۱۰]:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \quad (1-1)$$

$\omega_p$  فرکانس غیر نسبیته پلاسماست که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

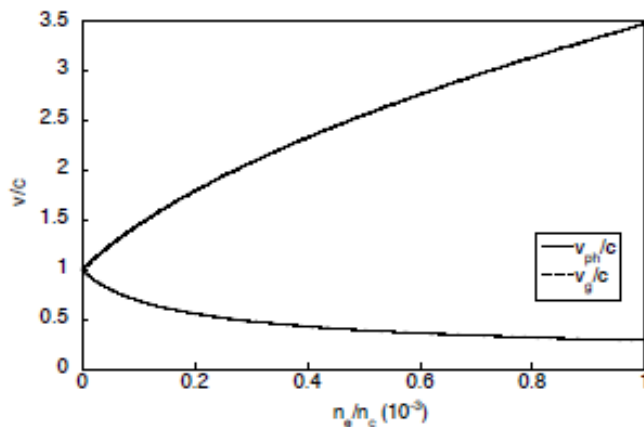
$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (2-1)$$

که  $n_e$  چگالی الکترون‌های پلاسما و  $m_e$  جرم الکترون است. موج الکترومغناطیسی با فرکانس  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda$  در صورتی می‌تواند وارد پلاسما شود که  $\omega_0 > \omega_p$  باشد، اگر  $\omega_0 < \omega_p$  موج نمی‌تواند وارد پلاسما شود. از برابر قرار دادن  $\omega_0 = \omega_p$  می‌توانیم چگالی بحرانی که مرز عبور و عدم عبور موج است را بدست آوریم:

$$n_c = \frac{m_e \omega_0^2}{4\pi e^2} = \frac{1.22 \times 10^{21}}{\lambda^2 (\mu\text{m})} (\text{cm}^{-3}) \quad (3-1)$$

اگر  $n_e < n_c$  پلاسما کم چگال<sup>۱</sup> است و اگر  $n_e > n_c$  پلاسما را پُرچگال<sup>۲</sup> گویند.

در شکل (۱-۱) سرعت فاز پالس لیزری در پلاسما  $v_{ph}/c = \omega/k = (1 - n_e/n_c)^{-1/2}$  و سرعت گروه پالس  $v_g/c = \partial\omega/\partial k = (1 - n_e/n_c)^{1/2}$  برحسب تابعی از  $n_e/n_c$  ترسیم شده است. دیده می‌شود با افزایش چگالی الکترون، سرعت گروه کاهش پیدا می‌کند، درحالی‌که سرعت فاز افزایش می‌یابد.



شکل (۱-۱): سرعت فاز بی‌بُعد  $v_{ph}/c$  و سرعت گروه بی‌بُعد  $v_g/c$  برحسب تابعی از  $n_e/n_c$ .

<sup>1</sup> Underdense Plasma

<sup>2</sup> Overdense Plasma