



## دانشگاه مازندران

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی - مولکولی

موضوع:

هدایت پالس لیزر تراوات از پلاسمای مویینه جهت شتابدهی

ذرات باردار

استاد راهنما:

دکتر فرشاد صحبت زاده

استاد مشاور:

دکتر سعید میرزانژاد

نام دانشجو:

شبنم رستم پوران

آذر ماه ۱۳۸۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## دانشگاه مازندران

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی - مولکولی

موضوع:

هدایت پالس لیزر تراوات از پلاسمای مویینه جهت شتابدهی  
ذرات باردار

استاد راهنما:

دکتر فرشاد صحبت زاده

استاد مشاور:

دکتر سعید میرزائزاد

اساتید داور:

دکتر خصالی

دکتر میلانی

نام دانشجو:

شبنم رستم پوران

آذر ماه ۱۳۸۷

## سپا سگزاری

نهایت سپاس و امتنان قلبی خود را به پدر و مادر شیرین و مهربانم که همواره دعای خیرشان بدرقه راهم بود و حضور سبزشان، مایه دلگرمی و آرامشم، تقدیم می‌نمایم. همچنین بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد راهنمای متین و ارجمندم، دکتر فرشاد صحبت‌زاده که با صبر و حوصله فراوان مرا در انجام این کار یاری دادند، صمیمانه قدردانی کنم. از استاد مشاور گرامی، دکتر سعید میرزائزاد نیز کمال تشکر را دارم. در پایان از تمامی کسانی که به نوعی در تکمیل این پایان‌نامه به من کمک نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تقدیم به

همراه زندگی، همسرم

## چکیده

در این پایان‌نامه هدایت پالس لیزر پر شدت فمتو ثانیه از درون کانال پلاسمای ناهمگن بررسی شده است. تغییرات لکه‌ی لیزر، قدرت میدان الکتریکی، میدان عقبه‌ی تولید شده و دوام پالس برای شرایط مختلف کانال پلاسما و لیزر شبیه‌سازی گشته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اندازه‌ی میدان عقبه‌ی تولید شده در کانال پلاسمای ناهمگن به مشخصات اولیه‌ی پالس لیزر و کانال پلاسما وابسته است. بنابراین شتاب الکترون در کانال پلاسما توسط شرایط اولیه‌ی پالس لیزر و کانال قابل کنترل می‌باشد. در آخر به این نتیجه رسیدیم که پالس لیزر چیرپ نشده در هنگام انتشار در کانال به طور خودبه‌خود چیرپ می‌گردد. همچنین دوام پالس لیزر با انتشار آن در کانال و بسته به شرایط اولیه، کوتاه‌تر یا بلندتر می‌شود که این تغییرات می‌تواند در شتابدهی الکترون توسط میدان عقبه تاثیر گذار باشد و در کارهای آتی بررسی گردد.

**واژه‌های کلیدی:** کانال پلاسما، میدان عقبه، شتابدهی الکترون، چیرپ شدگی، شرایط سازگاری

## فهرست اشکال

شکل	صفحه
شکل ۱-۱- نمایی از پیش بینی شتابدهنده‌ی لیزری قوی تر با افزایش طول کانال	۴
شکل ۱-۲- نمایشی از امواج دریا که در پشت یک قایق موتوری تولید شده و به موج سواران شتاب می‌دهد.	۶
شکل ۱-۳- عبور پالس لیزر از درون پلاسما و تولید میدان عقبه که الکترون‌های پلاسما را گیر انداخته و شتاب می‌دهد	۶
شکل ۱-۲- واگرایی لیزر پس از طول ریلی و نسبت واگرایی با اندازه‌ی لکه‌ی اولیه‌ی لیزر	۱۰
شکل ۲-۲- مقایسه‌ی تغییرات لکه‌ی لیزر در دو حالت خلا و هدایت در کانال پلاسمایی	۱۱
شکل ۲-۳- میدان الکتریکی در موج گوسی	۱۴
شکل ۲-۴- تغییرات چگالی الکترونی در داخل کانال پلاسما	۱۵
شکل ۲-۵- هدایت پالس لیزر از داخل کانال بدون واگرایی	۱۶
شکل ۲-۶- شکل پالس گوسی و تغییرات چگالی الکترونی در راستای شعاع	۱۷
شکل ۲-۷- نوسانات لکه‌ی لیزر در داخل کانال	۱۸
شکل ۲-۸- نمایی از شتابدهنده‌ی مویینه تخلیه‌ی الکتریکی	۱۹
شکل ۲-۹- نمایی از شتابدهنده‌ی میدان عقبه‌ی مویینه. کانال پلاسما در لوله‌ی مویینه به روش تخلیه‌ی الکتریکی ساخته می‌شود. گاز هیدروژن از دو باریکه وارد لوله‌ی مویینه شده و توسط میدان الکتریکی، یونیزه می‌گردد.	۲۰
شکل ۲-۱۰- با عبور پالس لیزر از پلاسما و تولید نیروی پیشران، بارهای آزاد در محیط بدون توجه به علامت بارشان از قله‌ی لیزر دور شده و به اطراف رانده می‌شوند در نتیجه بارها از یکدیگر جدا شده و بین آنها یک میدان طولی ایجاد می‌شود که به الکترون‌ها شتاب خواهد داد.	۳۲
شکل ۳-۱- نمایی از قسمت تند تغییر میدان الکتریکی با فرکانس ثابت	۴۵
شکل ۳-۲- نمایی از قسمت تند تغییر میدان الکتریکی با فرکانس وابسته به زمان	۴۶
شکل ۳-۳- الف- نمایی از چیرپ شدگی مثبت	۴۷
شکل ۳-۳- ب- نمایی از چیرپ شدگی منفی	۴۷
شکل ۳-۴- تغییرات دوام پالس در طول انتشار، برای دو کانال با شعاع‌های ذکر شده در شکل و چگالی	۴۸

- مرکز  $n=1/56 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $\Delta n=1/74 * 10^{21}$  برای پالس با  $p=0/6 Tw$ ،  $\beta=10$  و  $T=80 \text{ fs}$
- ۴۹ شکل ۳-۵- تغییرات دوام پالس در طول انتشار، برای کانالی با شعاع  $0/04 \text{ cm}$  و چگالی مرکز  $n=1/56 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $\Delta n=1/74 * 10^{21}$  برای سه پالس با  $p=0/6 Tw$ ،  $T=80 \text{ fs}$  و  $\beta$  های متفاوت
- ۵۰ شکل ۳-۶- تغییرات دوام پالس در طول انتشار، برای کانالی با شعاع  $0/04 \text{ cm}$  و چگالی مرکز  $n=1/56 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $\Delta n=1/74 * 10^{21}$  برای دو پالس با  $T=80 \text{ fs}$  و  $\beta=0$  و شدت های متفاوت
- ۵۱ شکل ۳-۷- تغییرات دوام پالس برای دو کانال با شرایط ذکر شده در شکل (۳-۴)
- ۵۲ شکل ۳-۸- تغییرات ضریب چیرپ شدگی در طول انتشار برای سه پالس با  $\beta$  های متفاوت با شرایط ذکر شده در شکل (۳-۵)
- ۵۳ شکل ۳-۹- تغییرات ضریب چیرپ شدگی برای دو پالس با شدت های متفاوت با شرایط ذکر شده در شکل (۳-۶)
- ۵۴ شکل ۳-۱۰- چیرپ شدگی در داخل پالس لیزر در طول پالس در سه محل متفاوت با  $\beta=10$  در داخل کانال  $r=10 \mu\text{m}$ ،  $R=0/04 \text{ mc}$  و باقی شرایط مانند شکل (۳-۴)
- ۵۵ شکل ۳-۱۱- چیرپ شدگی در داخل پالس لیزر در طول پالس در سه محل متفاوت با  $\beta=-10$  در داخل کانال  $r=10 \mu\text{m}$ ،  $R=0/04 \text{ mc}$  و  $\beta=-10$  باقی شرایط مانند شکل (۳-۴)
- ۵۶ شکل ۳-۱۲- چیرپ شدگی مثبت و منفی برای سه پالس ورودی با  $\beta$  های متفاوت و شرایط شکل (۳-۵)
- ۵۷ شکل ۳-۱۳- چیرپ شدگی در داخل پالس لیزر در طول پالس در سه محل متفاوت در داخل کانال  $r=10 \mu\text{m}$ ،  $R=0/04 \text{ mc}$  و  $\beta=0$  باقی شرایط مانند شکل (۳-۴)
- ۵۹ شکل ۴-۱- میدان عقبه بی بعد شده لیزر، برای کانال با شعاع  $0/04 \text{ cm}$  چگالی مرکز  $n=1/56 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $\Delta n=1/74 * 10^{21}$  برای پالس با  $r=10 \mu\text{m}$ ،  $p=0/6 Tw$ ،  $\beta=10$  و  $T=80 \text{ fs}$  در ابتدای کانال
- ۶۰ شکل ۴-۲- میدان عقبه در دو محل ذکر شده در شکل با شرایط شکل (۴-۱)
- ۶۱ شکل ۴-۳- میدان عقبه در  $Z=1 \text{ cm}$  داخل کانال برای دو پالس با شدت های متفاوت و شرایط شبیه سازی شکل (۴-۱)
- ۶۲ شکل ۴-۴- میدان عقبه در  $Z=1 \text{ cm}$  داخل کانال برای سه پالس با  $\beta$  های متفاوت و باقی شرایط



همانند شکل (۱-۴)

۶۳ شکل ۴-۵- میدان عقبه در دو کانال با شعاع‌های متفاوت برای دو پالس با توان یکسان و شرایط  
شکل (۱-۴)

۶۴ شکل ۴-۶- آشفتنگی چگالی الکترونی نسبت به چگالی مرکز کانال را در مقایسه با میدان بی‌بعد  
با شرایط شبیه سازی در شکل (۱-۴)

۶۵ شکل ۴-۷- آشفتنگی چگالی الکترونی در دو مکان با شرایط شبیه سازی شکل (۲-۴)

۶۵ شکل ۴-۸- آشفتنگی چگالی الکترونی برای دو پالس با توان‌های متفاوت و شرایط شبیه سازی  
شکل (۳-۴)

۶۶ شکل ۴-۹- آشفتنگی الکترونی برای سه پالس با ضرایب چیرپ شدگی متفاوت و شرایط  
شبیه سازی شکل (۴-۴)

۶۶ شکل ۴-۱۰- آشفتنگی الکترونی برای دو پالس با توان یکسان در دو کانال با شعاع‌های متفاوت  
و شرایط شبیه سازی شکل (۵-۴)

۶۷ شکل ۴-۱۱- تغییرات اندازه‌ی لکه‌ی لیزر در طول انتشار در کانال در دو حالت سازگار و  
ناسازگار با شرایط شبیه سازی شکل (۱-۴)

۶۸ شکل ۴-۱۲- تغییرات اندازه‌ی دامنه‌ی بی بعد میدان الکتریکی لیزر در طول انتشار در کانال  
در دو حالت سازگار و ناسازگار با شرایط شبیه سازی شکل (۱-۴)

۶۹ شکل ۴-۱۳- پالس لیزر در سه مکان داخل کانال با شرایط شبیه سازی شکل (۱-۴)

۶۹ شکل ۴-۱۴- پالس لیزر در دو مکان داخل کانال با شرایط شبیه سازی شکل (۱-۴)

۷۰ شکل ۴-۱۵- تغییرات لکه‌ی لیزر در طول پالس در سه مکان با شرایط شبیه سازی شکل (۱۳-۴)

۷۱ شکل ۴-۱۶- تغییرات لکه‌ی لیزر در طول پالس در مکان  $Z = 2\text{cm}$  با شرایط شبیه سازی شکل (۱۳-۴)

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مقدمه
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۱-۲- شتابدهنده‌های کلاسیک
۲	۱-۳- شتابدهنده‌های لیزری
۳	۱-۳-۱- شتابدهنده در محیط خلا
۳	۱-۳-۲- شتابدهنده در محیط پلاسما
۵	۱-۳-۲-۱- شتابدهی توسط میدان عقبه در پلاسما
	<b>فصل دوم- انتقال پالس لیزر از کانال پلاسمای ناهمگن و محاسبه‌ی معادلات حاکم بر میدان لیزر در این کانال</b>
۹	۱-۲- مقدمه
۹	۲-۲- هدایت پالس لیزر در داخل پلاسما
۱۱	۱-۲-۲- خود کانونی نسبی
۱۲	۲-۲-۲- کانال پلاسما
۱۵	۱-۲-۲-۲- کانال تهی شده
۱۶	۲-۲-۲-۲- کانال شلجمی
۱۶	۳-۲- معادله‌ی حاکم بر میدان الکتریکی لیزر در کانال پلاسمای شلجمی
۲۰	۱-۳-۲- قطبش
۲۲	۲-۳-۲- چگالی جریان
۲۳	۳-۳-۲- چشمه‌ی نسبی
۲۳	۴-۳-۲- چشمه‌ی میدان عقبه
۲۵	۴-۲- میدان عقبه
۳۱	

۳۳ ۵-۲- شتاب الکترون

## فصل سوم-معادلات حاکم بر تغییرات پارامترهای پالس لیزر در درون

۳۵ کانال پلاسما

۳۵ ۱-۳- حل معادله حاکم بر انتشار لیزر در کانال پلاسمای ناهمگن

۳۶ ۲-۳- روش حل معادله

۳۶ ۱-۲-۳- روش برابر قرار دادن ضرایب

۳۹ ۳-۳- بی بعد سازی

۴۰ ۴-۳- میدان های لیزر

۴۲ ۵-۳- شرایط سازگاری

۴۴ ۶-۳- چیرپ شدگی

## ۵۸ فصل چهارم- بررسی نتایج شبیه سازی

۵۸ ۱-۴- نتایج شبیه سازی

۷۱ ۲-۴- فرایند شتابدهی

۷۲ ۳-۴- نتیجه گیری و چشم انداز

## لیست علائم و اختصارات

PBWA

Plasma Beat Wave Accelerator

LWFA

Laser Wakefield Accelerator

SMLWFA

Self-Modulated LWFA

## فصل اول - مقدمه

### ۱-۱ - مقدمه

باریکه ذرات پر انرژی دارای کاربرد های فراوانی در علوم کاربردی و پایه هستند. برای بسیاری از تحقیقات در زمینه های ساختار مواد، فضا و زمان، فیزیکدانان نیاز به بررسی برهم کنشهای ذرات پر انرژی دارند. در سطوح پیچیده تر فیزیکدانان هسته ای یا کیهانشناسان می توانند از باریکه های هسته ای اتمی برای کشف ساختار مواد، برهم کنش و خصوصیات هسته و مواد چگال در دما و چگالی بسیار بالا، مانند آنچه در اولین لحظه انفجار بزرگ اتفاق افتاده، استفاده کنند. این بررسی ها بیشتر شامل برخورد هسته ای اتم های سنگین مانند طلا و آهن در انرژی های چندین گیگا الکترون ولت است. در سطح انرژی های پایین تر، از باریکه های هسته ای شتابدار جهت درمان سرطان در پزشکی استفاده می کنند [۱]. علاوه بر موارد ذکر شده، می توان از الکترون های پر انرژی جهت تولید فوتون با انرژی بالا مانند اشعه ایکس یا تابش های سینکروترونی استفاده نمود. این فوتون ها کاربردهای فراوانی در مطالعه ای ساختار اتم، شیمی، فیزیک ماده چگال، زیست شناسی و تکنولوژی دارند.

با توجه به کاربرد گسترده‌ی ذرات باردار پرنرژی در زمینه‌های تحقیقاتی و صنعتی، تولید این‌گونه ذرات همواره مد نظر دانشمندان قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که در دهه‌های اخیر ساخت شتابدهنده‌ها به عنوان دستگامی که می‌تواند ذرات با سرعت‌های بسیار بالا و گاهی نزدیک به سرعت نور تولید کند، بسیار مورد توجه بوده است. شتابدهنده‌ها را با توجه به تفاوت در چگونگی شتابدهی، به دو دسته‌ی مهم تقسیم می‌کنند.

### ۱-۲- شتابدهنده‌های کلاسیک

در این دسته از شتابدهنده‌ها از میدان‌های الکتریکی که به یکی از روش‌های الکتروستاتیکی، القایی یا رادیو فرکانسی تولید شده به طور مستقیم برای شتابدهی به ذرات استفاده می‌کنند. شتابدهنده‌های کلاسیک را بر اساس شکل ظاهری می‌توان به دو دسته‌ی مهم، شتابدهنده‌های خطی و شتابدهنده‌های دایروی تقسیم نمود [۱]. به دلیل جنس و ساختمان این دسته از شتابدهنده‌ها، بیشترین اندازه‌ی میدان الکتریکی که می‌توان در آن‌ها تولید و برای شتابدهی استفاده نمود به  $50 MVm^{-1}$  محدود می‌شود. در صورت تولید میدان‌های قوی‌تر، پدیده‌ی تخلیه‌ی الکتریکی در سطوح موجبر یا شتابدهنده رخ می‌دهد و باعث خرابی شتابدهنده خواهد شد. بنابراین برای دستیابی به ذرات با انرژی‌های بالا باید ابعاد شتابدهنده‌ها را افزایش داد که از نظر صنعتی، تولید و استفاده از آن‌ها را با مشکل روبرو می‌سازد. به طور مثال می‌توان به شتابدهنده‌ی خطی LEP در CERN اشاره کرد که طول آن به ۲۷ Km می‌رسد. برای دستیابی به توضیحات بیشتر در مورد شتابدهنده‌های کلاسیک می‌توان به مراجع [۲-۵] مراجعه کرد.

### ۱-۳- شتابدهنده‌های لیزری

با وارد شدن لیزر به عرصه‌ی شتابدهی، ساخت شتابدهنده‌های با حجم بسیار کوچک تر و هزینه‌های بسیار پایین تراز انواع کلاسیک آن امکان پذیر شد که نشان دهنده‌ی اهمیت بررسی این نسل از شتابدهنده‌ها است [۳]. در شتابدهنده‌های لیزری، از میدان الکترومغناطیسی لیزر به طور مستقیم یا غیر

مستقیم برای شتاب دادن به ذرات استفاده می‌کنند. با پیشرفت سریع در تولید لیزرهای پرشدت، شتابدهنده‌های لیزری با ابعادی بسیار کوچکتر از ابعاد انواع کلاسیک و در حد چند سانتی متر ساخته شد [۴]. به دلیل اهمیت و کاربرد زیاد این شتابدهنده‌ها در علوم مختلف، ساخت و تحقیق در مورد این دسته از شتابدهنده‌ها همواره مورد توجه محافل علمی قرار گرفته، به گونه‌ای که تا به امروز طیف وسیعی از تحقیقات در زمینه‌های فیزیک اتمی را به خود اختصاص داده است. شتابدهنده‌های لیزری را با توجه به محیطی که برای شتابدهی به ذرات استفاده می‌کنند به دو دسته‌ی مهم تقسیم می‌نمایند.

### ۱-۳-۱- شتابدهنده‌ها در محیط خلا

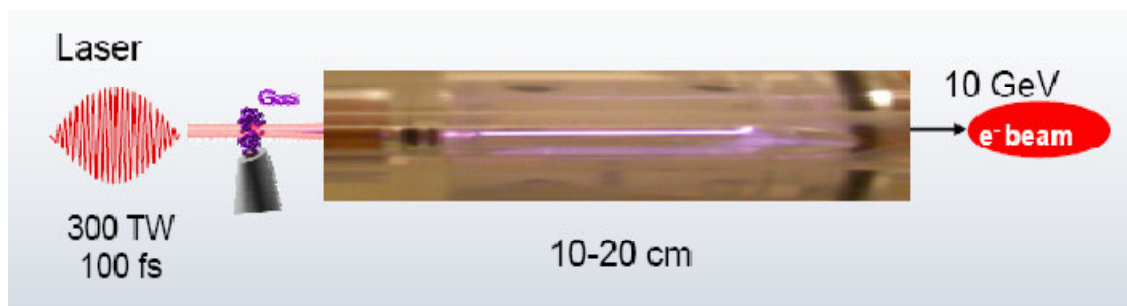
در این شتابدهنده‌ها، الکترون به طور مستقیم در برهم کنش با لیزر قرار گرفته و در شرایطی می‌تواند از آن شتاب بگیرد. در یکی از مدل‌های ارائه شده توسط K.P.Singh در سال ۲۰۰۴، انرژی الکترون‌ها از  $4/5 \text{ MeV}$  به  $1 \text{ GeV}$  رسید [۶]. وی در این مدل علاوه بر میدان لیزر از یک میدان مغناطیسی یکنواخت برای شتابدهی استفاده نمود.

### ۱-۳-۲- شتابدهنده‌ها در محیط پلاسما

محیط پلاسما به دلیل تحمل میدان‌های الکتریکی قوی، یکی از محیط‌های جالب جهت شتابدهی ذرات است [۷]. در شتابدهنده‌های پلاسمایی، ذرات از امواج طولی تولید شده در پلاسما که به میدان عقبه<sup>۱</sup> معروفند، انرژی می‌گیرند. تاکنون آزمایشگاه‌های زیادی در زمینه‌ی تولید امواج پلاسمایی پرشدت به منظور شتابدهی ذرات کار کرده‌اند که موفق‌ترین آنها تولید امواج در پلاسما توسط پالس لیزر است [۶]. این روش اولین بار توسط Tajima, Dawson در سال ۱۹۷۲ پیشنهاد شد [۸] تا اینکه در سال ۱۹۹۶ گروهی از دانشمندان نشان دادند که الکترون‌های تزریق شده در پلاسما می‌توانند توسط این امواج گیر افتاده و شتاب بگیرند [۶]. یک پالس لیزر کوتاه، در حد طول موج پلاسما، امواجی را در داخل پلاسما تولید می

<sup>۱</sup> Wake field

کند که می‌تواند به الکترون‌ها تا انرژی‌های بالا شتاب دهد. در شتابدهنده‌های پلاسمایی و به روش میدان عقبه (LWFA)، یک پالس لیزر کوتاه با طول زمانی ۵۰ fs و شدت حدود  $10^{18} \text{ W/cm}^2$  می‌تواند میدان الکتریکی ای در حد  $100 \text{ Gv/m}$  تولید کند و انرژی ذرات را در فاصله‌ی چند میلی‌متر به بیش از MeV ۱۰۰ برساند [۸]. بیشترین انرژی الکترونی که تا به حال گزارش شده است  $1 \text{ GeV}$  می‌باشد که توسط گروه Leemans در سال ۲۰۰۷ به دست آمده است. این شتابدهنده‌ی لیزری کوتاهترین شتابدهنده می‌باشد که می‌تواند انرژی باریکه‌ی الکترونی را در طول  $3/3 \text{ cm}$  از حالت سکون به مرز گیگا الکترون ولت برساند. پیش بینی می‌شود که با افزایش طول شتابدهنده، بتوان انرژی الکترون‌ها را به چند گیگا الکترون ولت رساند. شکل زیر یکی از این شتابدهنده‌ها را نشان می‌دهد، که توسط گروه Leemans پیش بینی شده و می‌تواند انرژی الکترون را در طول  $10 \text{ cm}$  به  $10 \text{ GeV}$  برساند [۱۸].



شکل ۱-۱- نمایی از پیش بینی شتابدهنده‌ی لیزری قوی‌تر با افزایش طول کانال [۹].

برای دستیابی به انرژی‌های بالا در شتابدهنده‌های به روش میدان عقبه به لیزرهای با شدت زیاد و طول زمانی کمتر از اپیکو ثانیه نیاز است. امواج کوتاه پرشدت تنها راه تولید امواج در پلاسما نیست. برای سالهای متمادی، برخی از گروهها از روش زنش برای تولید امواج در پلاسما استفاده می‌کردند. در این روش دو پالس لیزر بلند در حد  $100 \text{ ps}$  با شدت  $10^{15} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$  داخل پلاسمای کم چگال تزریق می‌شود، به طوری که اختلاف فرکانس دو پالس برابر فرکانس پلاسما باشد. تحت این شرایط امواج پلاسمای بلند دامنه با سرعت گروه نزدیک به سرعت نور در پلاسما تولید می‌گردد و می‌تواند به ذرات داخل پلاسما شتاب دهد [۷]. به طور کلی روش‌های تولید امواج در شتابدهنده‌های پلاسمایی را می‌توان به صورت زیر دسته بندی نمود:



الف) شتابدهی توسط میدان زنجی در پلاسما<sup>۱</sup> (PBWA) که در آن از پالس لیزر بلند و انرژی متوسط استفاده می شود [۱۰].

ب) شتابدهی توسط امواج میدان عقبه<sup>۲</sup> (LWFA) که در آن از پالس لیزر فشرده و پر شدت استفاده می شود [۱۱-۱۲-۱۳].

ج) خود مدولاسیون میدان عقبه<sup>۳</sup> (SMLWFA)

د) شتابدهی توسط لیزر الکترون آزاد معکوس<sup>۴</sup> (IFEL)

در این پایان نامه به بررسی تغییر پارامترهای پالس لیزر در طول انتشار در کانال پلاسمای ناهمگن پرداخته و شرایط لازم برای لیزر و کانال پلاسما را برای انتشار پالس لیزر در کانال به دست خواهیم آورد. سپس اثر این تغییرات را در تولید میدان عقبه بررسی خواهیم نمود تا از این طریق به پارامترهای بهینه‌ی اولیه لیزر و پلاسما جهت شتابدهی توسط میدان عقبه در کانال‌های پلاسمای ناهمگن دست یابیم. به‌طوریکه اثر مثبت این تغییرات بر روی شتاب در کارهای بعدی مورد توجه و مطالعه قرار گیرد. در این جا لازم است توضیح کوتاهی در مورد تشکیل میدان عقبه ارائه شود.

### ۱-۲-۳-۱- شتابدهی توسط میدان عقبه<sup>۵</sup> در پلاسما (LWFA)

در این روش یک پالس کوتاه که فرکانس آن خیلی بزرگتر از فرکانس پلاسما می‌باشد، با تولید یک نیروی غیرخطی می‌تواند به الکترون‌های داخل محیط پلاسما شتاب دهد. ایجاد میدان عقبه داخل پلاسما را

۱ Plasma Beat Wave Accelerator

۲ Laser Wakefield Accelerator

۳ Self-Modulated LWFA

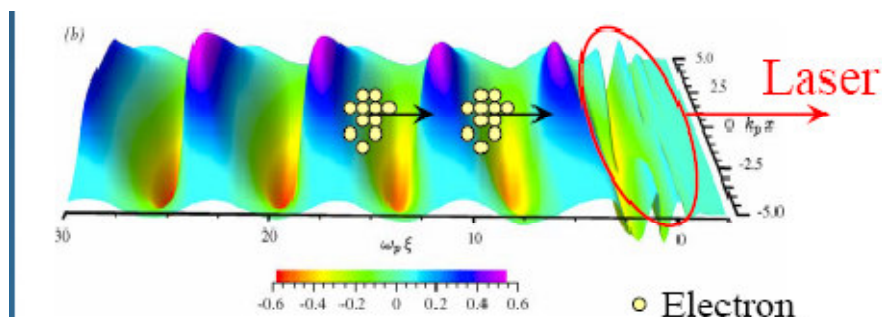
۴ Inverse Free Electron Laser

۵ Wakefield

می توان همانند شکل (۱-۲)، به صورت موج ایجاد شده در پشت یک قایق موتوری تصور نمود که می تواند به یک موج سوار شتاب دهد.



شکل ۱-۲- نمایشی از امواج دریا که در پشت یک قایق موتوری تولید شده و به موج سواران شتاب می دهد.



شکل ۱-۳- عبور پالس لیزر از درون پلاسما و تولید میدان عقبه که الکترون های پلاسما را گیر انداخته و شتاب می دهد [۹].

همانطوری که در شکل (۱-۳) می بینید با عبور پالس لیزر از درون محیط پلاسما، میدان الکتریکی باعث نوسان ذرات باردار در جهت میدان می شود. این ذرات همچنان یک نیروی غیر خطی به نام نیروی پیشران<sup>۱</sup> را تجربه می کنند [۱۴] که به آن ها در جهت موج عبوری نیرو وارد می نماید که در فصل بعدی بیشتر به آن پرداخته خواهد شد. حال به دلیل جدایی بارهای مثبت و منفی در داخل پلاسما و ایجاد اختلاف

<sup>۱</sup> Ponderomotive Force

پتانسیل بین آنها، یک میدان الکتریکی طولی به نام میدان عقبه در پشت پالس تولید می‌شود که می‌تواند به الکترون‌ها شتاب دهد.

با پیشرفت سریع در تکنولوژی لیزر و تولید لیزرهای قوی، مطالعه‌ی برهم‌کنش‌های غیر خطی و نسبیتی الکترون-لیزر که سهم به‌سزایی در شتابدهنده‌های لیزری دارند، مورد توجه قرار گرفت که از جمله‌ی این پدیده‌ها می‌توان به چند نمونه‌ی زیر اشاره نمود [۱۵-۱۶-۱۷]

الف) تولید میدان عقبه در پلاسما

ب) خود کانونی نسبیتی<sup>۱</sup> و هدایت لیزر در کانال پلاسما

ج) مدولاسیون خود فاز نسبیتی

که در فصل بعدی به توضیح این موارد پرداخته و اثر آن‌ها را در تغییر پارامترهای پالس لیزر بررسی می‌نماییم.

در این پایان‌نامه، در فصل دوم به راه‌های انتقال پالس لیزر بدون واگرایی در محیط پلاسما پرداخته و شرایط اولیه‌ی پالس لیزر و کانال پلاسما جهت انتشار پالس لیزر با توان کمتر از توان نسبیتی در کانال پلاسما را به‌دست خواهیم آورد تا از این طریق بتوان طول برهم‌کنش لیزر و پلاسما را بیشتر از طول ریلی نمود که یکی از شرایط لازم جهت شتابدهی الکترون‌ها توسط میدان عقبه در محیط پلاسما می‌باشد. سپس روابط حاکم بر میدان‌های الکتریکی لیزر در کانال پلاسما با در نظر گرفتن اثرات نسبیتی، میدان عقبه، پاشندگی و محدود بودن اندازه‌ی شعاع لکه‌ی لیزر در کانالی با چگالی ناهمگن را به‌دست آورده‌ایم که این معادلات به صورت یک‌جا با توجه به اثرات ذکر شده در هیچ مقاله‌ای به‌دست نیامده است. در فصل سوم نیز به حل تحلیلی معادله‌ی حاکم بر میدان الکتریکی لیزر پرداخته و معادلات حاکم بر تغییرات پارامترهای لیزر

<sup>۱</sup> Relativistic Self Focusing

در کانال، با توجه به اثرات بیان شده به دست خواهد آمد. این معادلات به همراه معادلات حاکم بر میدان عقبه‌ی لیزر و چگالی ناشی از میدان عقبه به طور هم‌زمان از روش رانگ گوتای مرتبه‌ی چهارم حل شده و نتایج عددی آن به صورت نمودار در فصل چهارم آمده است. با بررسی نمودارهای به دست آمده می‌توان شرایط بهینه‌ی پالس ورودی لیزر و کانال را برای شتابدهی از روش میدان عقبه در کانال پلاسمای ناهمگن برای کارهای آتی پیش بینی نمود.