



دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

شتاب‌دهنده‌های لیزری در لیزر الکترون آزاد معکوس

از

محدثه نیکراه

استاد راهنما

دکتر ساعد جعفری

شهریور ۹۳

تقدیم به مادرم که قلبش کم می‌تپد، ضعیف می‌تپد،  
اما حرفِ درسِ دخترش که می‌شود به تپش می‌افتد...

و تقدیم به پدرم که به ازای تکِ تکِ زخم‌های بی‌شمارِ ماندگارِ  
روی تنش، «وَلَا الضَّالِّينَ» برای به ثمر رسیدنِ نگه داشته...

به نام بزرگ ناشناس عالم علم

با تقدیر و تشکر از استاد عزیزم جناب آقای دکتر ساعد جعفری که به حق مرا در طول دوره تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد و نیز طی مراحل مختلف این تحقیق، صبورانه و مشفقانه راهنمایی کرده‌اند. بزرگواری که نه تنها علم، بلکه اخلاقِ خوش را نیز از مکتبِ ایشان باید آموخت.

همچنین با تشکر از جناب آقای دکتر ارشاد صادق طوسی و جناب آقای طاهر مقدمی، اساتیدی که با قبول زحمت مشاوره و کمک در جمع‌آوری منابع، مرا در انجام این کار یاری داده‌اند.

و بالاخره با تشکر از زحمات پدر، مادر، دوستان و یاورانِ همیشه همراهم که هر کدام به طریقی مشوق و محرکِ من در هر چه بهتر به عمل رساندنِ این مهم بودند.

محدثه نیکراه

تابستان ۹۳

مقدمه..... ۱

## فصل اول: انواع شتاب دهنده

- ۱-۱ شتاب دهنده های طبیعی..... ۳
- ۱-۱-۱ شتاب دهنده های رادیواکتیو..... ۳
- ۱-۱-۲ اشعه های کیهانی..... ۴
- ۲-۱ شتاب دهنده های ساخت بشر..... ۴
- ۱-۲-۱ شتاب دهنده های الکترواستاتیکی..... ۴
- ۱-۲-۲-۱ تیوب های اشعه ایکس..... ۴
- ۲-۱-۲-۱ شتاب دهنده های الکترواستاتیک کوک کرافت - والتون..... ۵
- ۳-۱-۲-۱ شتاب دهنده های وان دو گراف و تاندم..... ۷
- ۲-۲-۱ شتاب دهنده های القایی..... ۱۰
- ۱-۲-۲-۱ شتاب دهنده های خطی القایی..... ۱۰
- ۲-۲-۲-۱ بتاترون..... ۱۳
- ۳-۲-۱ سینکوترون..... ۱۵
- ۳-۱ اجزای مختلف شتاب دهنده سینکروترونی..... ۱۶
- ۴-۱ تفنگ الکترونی..... ۱۹
- ۵-۱ شتاب دهنده خطی..... ۲۰
- ۶-۱ بوستر یا سینکروترون فزاینده..... ۲۲

۲۳	.....	حلقه ذخیره	۷-۱
۲۵	.....	منابع تابش سیکروترون	۸-۱
۲۵	.....	۱-۸-۱ مگنت‌های منحرف کننده	
۲۵	.....	۲-۸-۱ افزاره‌های الحاقی	
۲۶	.....	۳-۸-۱ ویگلر	
۲۶	.....	۴-۸-۱ آندولاتور	
۲۷	.....	۵-۸-۱ خطوط باریکه	
۲۸	.....	۶-۸-۱ سرهای جلویی	
۲۹	.....	۷-۸-۱ اتاقک اپتیک	
۳۰	.....	۸-۸-۱ اتاقک آزمایشگاهی	
۳۰	.....	۹-۸-۱ کابین کنترل	

### فصل دوم: انواع لیزر الکترون آزاد معکوس

۳۲	.....	۱-۲ معرفی لیزر الکترون آزاد	
۳۳	.....	۱-۱-۲ اصول عملکرد	
۳۴	.....	۲-۱-۲ شرایط تشدید در لیزر الکترون آزاد	
۳۵	.....	۳-۱-۲ اجزای FEL	
۳۶	.....	۴-۱-۲ کاربردها	
۳۷	.....	۵-۱-۲ رژیم‌های عملکرد لیزر الکترون آزاد	
۳۸	.....	۶-۱-۲ تاریخچه FEL	

۲-۲ شتاب‌دهنده‌های لیزری..... ۴۰

۲-۲-۱ مزیت شتاب‌دهنده‌های لیزری بر دیگر شتاب‌دهنده‌ها..... ۴۰

۲-۲-۲ انواع شتاب‌دهنده‌های لیزری..... ۴۱

۲-۲-۳ مزایای استفاده از محیط خلأ در مقایسه با محیط پلاسما..... ۴۱

۳-۲ لیزر الکترون آزاد معکوس..... ۴۲

۲-۳-۱ آزمایشات لیزر الکترون آزاد معکوس انجام‌شده تاکنون در آزمایشگاه‌های

مختلف جهان..... ۴۲

۲-۳-۲ فیزیک لیزر الکترون آزاد معکوس..... ۴۳

۴-۲ شرط تشدید لیزر الکترون آزاد معکوس..... ۴۵

۵-۲ حفظ شرط تشدید..... ۴۶

### فصل سوم: لیزر الکترون آزاد معکوس با ویگلر مغناطیسی تخت و پیچشی

۳-۱ مقدمه..... ۴۹

۳-۲ مسیر حرکت الکترون در میدان مغناطیسی ویگلر تخت در حضور پالس لیزری با قطبش

تخت..... ۴۹

۳-۳ حل معادلات اندازه حرکت و انرژی به روش عددی..... ۵۲

۳-۳ بررسی نتایج شبیه‌سازی به روش عددی..... ۵۲

۳-۳-۱ اثر دوکی کردن دوره تناوب میدان ویگلر..... ۵۳

۳-۳-۲ اثر انرژی اولیه پرتو الکترونی..... ۵۴

- ۳-۳-۳ اثر طول پالس بر روی بهره الکترون..... ۵۵
- ۳-۴ حل معادلات حرکت به روش عددی..... ۵۸
- ۳-۵ بررسی نتایج عددی..... ۶۰
- ۳-۵-۱ تأثیر دوکی کردن دوره تناوب میدان ویگلر..... ۶۰
- ۳-۵-۲ تأثیر انرژی اولیه الکترون..... ۶۱
- ۳-۵-۳ اثر حضور میدان مغناطیسی هدایت محوری  $B_0$ ..... ۶۲
- ۳-۵-۴ تأثیر طول پالس..... ۶۳

### فصل چهارم: بررسی تأثیر پارامتر باریک‌ساز خارجی بر مسیر و انرژی الکترون شتاب داده شده به وسیله پرتو لیزر در داخل ویگلر الکترومغناطیسی موج ایستاده

- ۴-۱ مقدمه..... ۶۶
- ۴-۲ پرتوهای گوسی..... ۶۶
- ۴-۲-۱ فیزیک پرتو گوسی..... ۶۷
- ۴-۲-۲ تغییرات اندازه لکه (  $\omega(Z)$  ) یک پرتو گوسی..... ۶۸
- ۴-۳ ویگلرهای الکترومغناطیسی..... ۶۹
- ۴-۳-۱ ویگلر امواج ایستاده..... ۶۹
- ۴-۳-۱-۱ نحوه محاسبه میدان ویگلر موج ایستاده..... ۶۹
- ۴-۴ موج تخت..... ۷۰



۵-۴ مسیر حرکت الکترون در داخل یک ویگنر موج ایستاده در حضور پارامتر مغناطیسی

۷۰ .....باریک‌ساز خارجی

۷۰ .....۴-۵-۱ آنالیز و تحلیل عددی

۷۴ .....۴-۶ حل معادلات حرکت به روش عددی

### فصل پنجم: نمودارها و نتیجه‌گیری

۷۶ .....۵-۱ نتایج محاسبات عددی

۷۷ .....۵-۲ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Y

۷۸ .....۵-۳ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Y

۷۹ .....۵-۴ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Y

۸۰ .....۵-۵ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر سرعت محوری در جهت انتشار

۸۱ .....۵-۶ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر سرعت محوری در جهت انتشار

۸۲ .....۵-۷ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر مسیر نوسان-انتشار (X-Z) الکترون

۸۳ .....۵-۸ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر انرژی انتقال یافته به الکترون

۸۴ .....۵-۹ اثر پارامتر باریک‌ساز مخروطی ( $\alpha_0 t$ ) بر انرژی انتقال یافته به الکترون

۵-۱۰ اثر عدد موج لیزر بر مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Y در غیاب پارامتر

۸۵ .....باریک‌ساز ( $\alpha=0$ )

۵-۱۱ اثر عدد موج لیزر بر مسیر نوسان-انتشار (X-Z) الکترون در غیاب پارامتر

۸۶ .....باریک‌ساز ( $\alpha=0$ )

- ۱۲-۵ اثر عدد موج لیزر بر مسیر حرکت الکترون در صفحه X-Y در غیاب پارامتر  
 باریک‌ساز ( $\alpha=0.2$ ) ..... ۸۷
- ۱۳-۵ اثر عدد موج لیزر بر مسیر نوسان-انتشار (X-Z) الکترون در غیاب پارامتر  
 باریک‌ساز ( $\alpha=0.2$ ) ..... ۸۸
- ۱۴-۵ اثر عدد موج لیزر بر سرعت محوری در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ) ..... ۸۹
- ۱۵-۵ اثر عدد موج لیزر بر سرعت محوری در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ) ..... ۹۰
- ۱۶-۵ اثر عدد موج لیزر بر مسیر نوسان-انتشار (X-Z) الکترون در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ( $\alpha=0$ ) ..... ۹۱
- ۱۷-۵ اثر عدد موج لیزر بر سرعت محوری در حضور پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=1$ ) ..... ۹۲
- ۱۸-۵ اثر عدد موج لیزر بر سرعت محوری در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0.01$ ) ..... ۹۳
- ۱۹-۵ اثر عدد موج لیزر بر انرژی الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ) ..... ۹۴
- ۲۰-۵ اثر عدد موج لیزر بر انرژی الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ) ..... ۹۵
- ۲۱-۵ اثر عدد موج لیزر بر انرژی الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0.1$ ) ..... ۹۶
- ۲۲-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر مسیر الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ) .. ۹۷
- ۲۳-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر مسیر الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ) ۹۸
- ۲۴-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر مسیر الکترون در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ( $\alpha=0.1$ ) ..... ۹۹
- ۲۵-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر سرعت محوری در غیاب پارامتر باریک‌ساز  
 ( $\alpha=0$ ) ..... ۱۰۰
- ۲۶-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر سرعت محوری در غیاب پارامتر باریک‌ساز  
 ( $\alpha=0$ ) ..... ۱۰۱

- ۲۷-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر سرعت محوری در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ۱۰۲ .....( $\alpha=0.1$ )
- ۲۸-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر سرعت محوری در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ۱۰۳ .....( $\alpha=0.1$ )
- ۲۹-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر انرژی الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ).  
 ۱۰۴
- ۳۰-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر انرژی الکترون در غیاب پارامتر باریک‌ساز ( $\alpha=0$ ).  
 ۱۰۵
- ۳۱-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر انرژی الکترون در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ۱۰۶ .....( $\alpha=0.1$ )
- ۳۲-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $B_0$ ) بر انرژی الکترون در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ۱۰۷ .....( $\alpha=0.1$ )
- ۳۳-۵ اثر عدد موج لیزر بر مسیر نوسان-انتشار ( $X-Z$ ) الکترون در حضور پارامتر باریک‌ساز  
 ۱۰۸ .....( $\alpha=0.1$ )
- ۱۱۰ .....منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ شماتیک آزمایش رادرفورد، ..... ۴
- شکل ۲-۱ تیوب کالیدج. K: فیلیمان، A: آند، ..... ۶
- شکل ۳-۱ (a) شبکه پله ای چند برابر کننده ولتاژ (شتاب دهنده کوکرافت - والتون). (b) ..... ۷
- شکل ۴-۱ شتابدهنده کوک کرافت- والتون مدرن در آزمایشگاه فرمی. .... ۸
- شکل ۵-۱ اساس کار مولد وان دو گراف ..... ۹
- شکل ۶-۱ نمایی از یک شتاب دهنده تاندم دو طبقه. .... ۱۰
- شکل ۷-۱ اصول عملکرد شتاب دهنده خطی القایی ..... ۱۲
- شکل ۸-۱ شماتیکی از شتاب دهنده خطی القایی ..... ۱۳
- شکل ۹-۱ سلول القایی ..... ۱۴
- شکل ۱۰-۱ یکی از اولین بتاترون های ساخته شده در اوایل دهه ۱۹۴۰ : ماشین ۲۰ اینچی در دانشگاه ایلی نویز ..... ۱۵
- شکل ۱۱-۱ طرح شماتیک یک بتاترون. .... ۱۶
- شکل ۱۲-۱ نمای کلی از یک شتاب دهنده سینکروترونی و بخش های اصلی آن ..... ۱۸
- شکل ۱۳-۱ چیدمان ساختار شتاب دهنده سینکروترونی حالت اول ..... ۱۸
- شکل ۱۴-۱ چیدمان ساختار شتاب دهنده سینکروترونی حالت دوم ..... ۱۹
- شکل ۱۵-۱ تصاویر مختلفی از دو نمونه تفنگ الکترونی استفاده شده در بخش شتاب دهنده های خطی سینکروترون ..... ۲۱

- شکل ۱-۱۶ طرح اولیه یک شتابدهنده خطی ..... ۲۲
- شکل ۱-۱۷ تصویری از یک شتابدهنده بوستر ..... ۲۴
- شکل ۱-۱۸ تصویری از یک حلقه ذخیره شتاب دهنده سینکروترونی ..... ۲۵
- شکل ۱-۱۹ تصویر شماتیک از یک مگنت منحرف کننده و سیستم لازم برای استفاده تابش  
سینکروترونی ..... ۲۶
- شکل ۱-۲۰ نمایی از یک ویگلر ..... ۲۷
- شکل ۱-۲۱ نمایی از یک ۱-آندولاتور مگنتها ۲-باریکه الکترونی ۳-تابش سینکروترون ..... ۲۸
- شکل ۱-۲۲ نمایی از اتاقک های موجود در خط باریکه ..... ۲۹
- شکل ۲-۱ نمایی کلی از لیزر الکترون آزاد ..... ۳۵
- شکل ۲-۲ نمایی کلی از کاربردهای گوناگون لیزر الکترون آزاد ..... ۳۹
- شکل ۲-۳ نمایی از برهم کنش تک الکترون با موج الکترومغناطیس ..... ۴۶
- شکل ۲-۴ نمایی از برقراری شرط تشدید در  $FEL$  و  $IFEL$  ..... ۴۸
- شکل ۲-۵ جدول و نموداری از میدان ویگلر با دامنه و دوره متغیر به جهت حفظ شرط تشدید  
به کار رفته در  $IFEL$  ..... ۴۹
- شکل ۳-۱ نمایی از برهم کنش الکترون با پالس لیزری تخت در حضور ویگلر تخت ..... ۵۹
- شکل ۳-۱-الف منحنی انرژی الکترون ها برای  $2/5 \times 10^{-5}$  و  $\alpha = 0$  که شرط تشدید  
برای آن به ترتیب ۱۱۰۰ و  $\frac{\lambda_w}{\lambda_l} = 500$  است. ..... ۵۵
- شکل ۳-۱-ب منحنی مسیر الکترون ها برای  $2/5 \times 10^{-5}$  و  $\alpha = 0$  می باشد که شرط  
تشدید برای آن به ترتیب ۱۱۰۰ و  $\frac{\lambda_w}{\lambda_l} = 500$  است. ..... ۵۶

شکل ۳-۲-ب منحنی انرژی الکترون‌ها برای  $\alpha = 1 \times 10^{-5}(0.99)$  و  $2/5 \times$

۵۷..... $10^{-5}(0.099)$

شکل ۳-۳ منحنی انرژی الکترون‌ها برای طول پالس‌های  $\tau_l = 50,100,200,300$

شکل ۳-۴-الف منحنی انرژی الکترون‌ها برای  $\alpha = 2 \times 10^{-5}$  که شرط تشدید آن به

۶۲..... ترتیب ۱۱۰ و ۱۱۰۰ است  $\frac{\lambda_w}{\lambda_L}$

شکل ۳-۵-الف منحنی انرژی الکترون بر حسب  $Z$  برای  $0.99$  و  $0.999$  که شرط

۶۳..... تشدید آن، ۱۱۰ و ۱۱۰۰ می‌باشد  $\frac{\lambda_w}{\lambda_L} =$

شکل ۳-۵-ب منحنی انرژی الکترون بر حسب  $Z$  برای  $0.99$  و  $0.999$  که شرط

۶۳..... تشدید آن، ۱۱۰ و ۱۱۰۰ می‌باشد  $\frac{\lambda_w}{\lambda_L} =$

شکل ۳-۹ الف منحنی مسیر حرکت الکترون‌ها را برای  $B_0 = 0, 100 \text{ KG}$  در حضور پارامتر

۶۴..... دوکی کننده  $\alpha_\omega = 1 \times 10^{-6}$  ترسیم شده اند.

شکل ۳-۹ b منحنی انرژی الکترون‌ها را برای  $B_0 = 0, 100 \text{ KG}$  در حضور پارامتر دوکی

۶۴..... کننده  $\alpha_\omega = 1 \times 10^{-6}$

شکل ۳-۱۰ منحنی انرژی الکترون بر حسب  $Z$  برای طول پالسهای  $\tau = 50$  و  $100$  و  $200$  و  $300$

۶۵..... که شرط تشدید آنها ۶۵۰ و ۸۰۰ و ۱۱۰۰ و ۹۰۰ می‌باشد  $\frac{\lambda_w}{\lambda_L} =$

شکل ۱-۴. پهنای باریکه‌ی گاوسی.....

شکل ۵-۱ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $\gamma$ - $X$ ، با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=1$  ب) مسیر حرکت

۷۸..... الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$

- شکل ۵-۲ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $Y-X$ ، با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0.2$  (ب) مسیر  
 حرکت الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$ ، ..... ۷۹
- شکل ۵-۳ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $Y-X$ ، با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=-0.1$  (ب) مسیر  
 حرکت الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$ ، ..... ۸۰
- شکل ۵-۴ الف) نمودار سرعت محوری در جهت انتشار برای الکترون با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=1$   
 (ب) نمودار سرعت محوری در جهت انتشار برای الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$ ، ..... ۸۱
- شکل ۵-۵ الف) نمودار سرعت محوری در جهت انتشار برای الکترون با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0.2$   
 (ب) نمودار سرعت محوری در جهت انتشار برای الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$ ، ..... ۸۲
- شکل ۵-۶ الف) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه  $X-Z$ ، با  $\alpha=0.8$  (ب) مسیر نوسان-انتشار  
 الکترون در صفحه  $X-Z$  با  $\alpha=0.1$ ، ..... ۸۳
- شکل ۵-۷ الف) نمودار انرژی در جهت انتشار برای الکترون با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=1$  (ب) نمودار  
 انرژی در جهت انتشار برای الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$ ، ..... ۸۴
- شکل ۵-۸ الف) نمودار انرژی در جهت انتشار برای الکترون با ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0.1$  (ب)  
 نمودار انرژی در جهت انتشار برای الکترون بدون ضریب باریک‌ساز  $\alpha=0$ ، ..... ۸۵
- شکل ۵-۹ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $Y-X$ ، با  $K=50$  (ب) مسیر حرکت الکترون با  
 $K=150$ ، ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۰ الف) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه  $X-Z$ ، با  $K=50$  (ب) مسیر نوسان-انتشار  
 الکترون در صفحه  $X-Z$  با  $K=150$ ، ..... ۸۷
- شکل ۵-۱۱ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $Y-X$ ، با  $K=50$  (ب) مسیر حرکت الکترون با  
 $K=120$ ، ..... ۸۸

- شکل ۵-۱۲ الف) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه X-Z، با  $K = 50$  (ب) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه X-Z با  $K = 150$ ، ۸۹.....
- شکل ۵-۱۳ الف) سرعت محوری الکترون، با  $K = 50$  (ب) سرعت محوری  $K = 100$ ، ۹۰.....
- شکل ۵-۱۴ الف) سرعت محوری الکترون، با  $K = 500$  (ب) سرعت محوری  $K = 1000$ ، ۹۱.....
- شکل ۵-۱۵ الف) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه X-Z، با  $K = 500$  (ب) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه X-Z با  $K = 1000$ ، ۹۲.....
- شکل ۵-۱۶ الف) سرعت محوری الکترون، با  $K = 50$  (ب) سرعت محوری  $K = 100$ ، ۹۳.....
- شکل ۵-۱۷ الف) سرعت محوری الکترون، با  $K = 500$  (ب) سرعت محوری  $K = 1000$ ، ۹۴.....
- شکل ۵-۱۸ الف) انرژی الکترون، با  $K = 100$  (ب) انرژی الکترون  $K = 1000$ ، ۹۵.....
- شکل ۵-۱۹ الف) انرژی الکترون، با  $K = 200$  (ب) انرژی الکترون  $K = 1000$ ، ۹۶.....
- شکل ۵-۲۰ الف) انرژی الکترون، با  $K = 100$  (ب) انرژی الکترون  $K = 1000$ ، ۹۷.....
- شکل ۵-۲۱ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $\gamma$ -X، با  $b_0 = 0.1$  (ب) مسیر حرکت الکترون با  $b_0 = 0.3$ ، ۹۸.....
- شکل ۵-۲۲ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $\gamma$ -X، با  $b_0 = -0.1$  (ب) مسیر حرکت الکترون با  $b_0 = -0.3$ ، ۹۹.....
- شکل ۵-۲۳ الف) مسیر حرکت الکترون در صفحه  $\gamma$ -X، با  $b_0 = 0.1$  (ب) مسیر حرکت الکترون با  $b_0 = 0.3$ ، ۱۰۰.....
- شکل ۵-۲۴ الف) سرعت محوری الکترون، با  $b_0 = 0.1$  (ب) سرعت محوری  $k=100, b_0 = 0.8$ ، ۱۰۱.....
- شکل ۵-۲۵ الف) سرعت محوری الکترون، با  $b_0 = 0.1$  (ب) سرعت محوری  $k=1000, b_0 = 0.8$ ، ۱۰۲.....
- شکل ۵-۲۶ الف) سرعت محوری الکترون، با  $b_0 = 0.1$  (ب) سرعت محوری  $k=100, b_0 = 0.8$ ، ۱۰۳.....



شکل ۵-۲۷ الف) سرعت محوری الکترون، با  $b_0=0.1$  ب) سرعت محوری  $k=100, b_0=0.5$  ..... ۱۰۴

شکل ۵-۲۸ الف) انرژی الکترون، با  $b_0=0.1$  ب) انرژی  $k=100, b_0=0.8$  ..... ۱۰۵

شکل ۵-۲۹ الف) انرژی الکترون، با  $b_0=0.01$  ب) انرژی  $k=100, b_0=0.1$  ..... ۱۰۶

شکل ۵-۳۰ الف) انرژی الکترون، با  $B_0=0.1$  ب) انرژی  $k=100, B_0=0.8$  ..... ۱۰۷

شکل ۵-۳۱ الف) انرژی الکترون، با  $b_0=0.01$  ب) انرژی  $k=500, b_0=0.03$  ..... ۱۰۸

شکل ۵-۳۲ الف) مسیر نوسان-انتشار الکترون در صفحه X-Z، با  $K=200$  ب) مسیر نوسان-

انتشار الکترون در صفحه X-Z با  $K=500$ ، ..... ۱۰۹

## فهرست علائم اختصاری

شتاب‌دهنده‌ی دو قطبی فرکانس رادیویی : RFQ

شتاب دهنده القایی خطی : LIA

سینکروترون گرادیان متغیر : AGS

سینکروترون تابع جدا شده : AFS

لیزر الکترون آزاد : FEL

لیزر الکترون آزاد معکوس : IFEL

شتاب‌دهنده‌ی لیزر الکترون آزاد معکوس میکروویو : MIFELA

## شتاب‌دهنده‌های لیزری در لیزر الکترون آزاد معکوس

محدثه نیکراه

در این پایان‌نامه سعی می‌شود ابتدا شتاب‌دهنده‌های ذرات را از منظر تکنولوژی بررسی کرده و از تحولات تاریخی آنها صرف‌نظر شود. سپس به معرفی شتاب‌دهنده‌های لیزری در لیزر الکترون آزاد معکوس خواهیم پرداخت، که برای درک بهتر این منظور، نگاهی اجمالی به مفهوم و کاربرد لیزر الکترون آزاد خواهیم داشت. در ادامه پس از بررسی مواردی از لیزرهای الکترون آزاد معکوس در حضور ویگلهای الکترومغناطیسی تخت و پیچشی و نیز در حضور پارامتر باریک‌ساز، به معرفی نوع جدیدی از ویگلهای الکترومغناطیسی پرداخته، نتایج و نمودارهای ناشی از آن را مورد بحث قرار خواهیم داد. با اعمال پارامتر باریک‌ساز بصورت یک میدان مغناطیسی خارجی، برای مثال مشاهده شد که مسیر حرکت الکترون در صفحه  $x-y$  دچار تغییر شده و شکل مسیر از حالت دایروی بسته به حالت نوسانی در جهت  $(y)$  تبدیل شده و سرعت محوری الکترون در جهت انتشار  $(z)$  بصورت نزولی بوده و میزان نوسانات و تغییرات آن با افزایش مقدار پارامتر باریک‌کننده، کمتر می‌شود. انرژی الکترون نیز در امتداد حرکت محوری با زیاد شدن پارامتر باریک‌ساز، افزایش می‌یابد.

کلیدواژه : شتاب‌دهنده، لیزر الکترون آزاد معکوس، ویگله، باریک‌ساز.

# فصل اول

## انواع شتاب دهنده‌ها