دانشکده مهندسی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی مواد – الکتروسرامیک

شبیه‌سازی فوکوس بیم الکترونی در ساختار مغناطیسی متناوب تیوب‌های انتقال دهنده موج

به وسیله‌ی

معصومه اسکندریان

استاد راهنما

دکتر سیروس جوادپور

شهریور ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب معصومه اسکندریان (۸۸۰۸۷۳) دانشجوی رشته مهندسی مواد گرایش الکتروسرامیک دانشکده مهندسی اظهار می‌کنم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی: معصومه اسکندریان

تاریخ و امضاء: ۱۳۹۱/۶/۲۶

تقدیم به همسر و مادرم که:

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست.

سپاسگزاری

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض میدانم که از زحمات، راهنمایی‌های ارزشمند، همراهی بزرگوارانه و شکیبایی استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر سیروس جوادپور کمال تقدیر و تشکر را به عمل آورم. همچنین از عنایات و ارشادات اساتید مشاورم آقایان دکتر عبیری و دکتر هاشمی کمال سپاس و تشکر را دارم. با سپاس از آقایان مهندس هومن بهمن سلطانی دانشجوی دکترای بخش برق و مهندس محمد هوشمند کارشناس محترم بخش لامپ‌های مایکروویو در صنایع قطعات الکترونیک شیراز که با صبر و شکیبایی بسیار، اینجانب را در انجام این پایان‌نامه یاری رساندند.

سلامتی و موفقیت همیشگی تمام این بزرگواران را آرزومندم.

چکیده

شبیه سازی فوکوس بیم الکترونی در ساختار مغناطیسی متناوب تیوب های انتقال دهنده موج

به کوشش
معصومه اسکندریان

بیش از پنجاه درصد فروش تجهیزات مایکروویو مربوط به لامپ موج رونده است. لامپ موج رونده بهترین دستگاه برای تولید کارآمد توان مایکروویو در پهنای باند وسیع است. توانایی شبیه‌سازی جامع و سه بعدی کل لامپ و اثرات موج رادیویی، نیروهای بار فضایی و مغناطیسی بر پرتوی الکترونی در یک لامپ موج رونده مارپیچ برای طراحی و بهینه سازی این نوع لامپ حائز اهمیت بسیار است. نرم افزار شبیه‌ساز سه بعدی CST برای دست‌یابی به این هدف می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این پایان‌نامه اجزای یک لامپ موج رونده مارپیچ شامل تفنگ الکترونی، مدار موج آهسته و سیستم فوکوس مغناطیسی به منظور بررسی پروفایل و فوکوس پرتوی الکترونی در تفنگ و سیستم متناوب مغناطیس‌های دائم ساماریوم-کبالت، تست سرد و گرم، برهم‌کنش پرتو با موج RF، محاسبه توان خروجی، بهره، بازدهی الکترونی و نهایتاً اثر دما بر روی میدان مغناطیسی و پرتو در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. همچنین اثر پارامترهایی همچون طول سیستم فوکوس و جنس نگه‌دارنده‌های دی‌الکتریک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله تطابق بسیار خوبی با واقعیت داشتند که حاکی از توانایی و کاربری این نرم‌افزار در طراحی و شبیه‌سازی سایر لامپ‌های تقویت‌کننده موجود در صنایع مخابرات و الکترونیک با قابلیت‌های گسترده آن در حوزه مایکروویو و PIC است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱ طیف الکترومغناطیس ۵
۲-۲ منابع تولید امواج الکترومغناطیسی در ناحیه مایکروویو تا تراهرتز ۶
۲-۲-۱ تجهیزات نیمه رسانا ۶
۲-۲-۲ لامپ‌های مایکروویو ۷
۲-۲-۳ سایر منابع ۷
۲-۳ لامپ‌های مایکروویو ۸
۲-۳-۱ تاریخچه لامپ‌های مایکروویو ۸
۲-۳-۲ انواع لامپ‌های مایکروویو و کاربرد آن‌ها ۸
۲-۳-۲-۱ لامپ‌های پرتوی خطی (نوع O) ۱۰
۲-۳-۲-۲ تجهیزات میدان متعامد (نوع M) ۱۳
۲-۳-۲-۳. لامپ‌های موج سریع ۱۴
۲-۴ لامپ‌های موج رونده (TWT) ۱۴
۲-۴-۱ تاریخچه ۱۴
۲-۴-۲ کاربردها ۱۵
۲-۴-۳ انواع لامپ موج رونده TWT ۱۵
۲-۴-۳-۱ لامپ‌های موج رونده با حفره‌های جفت شده (CCTWT) ۱۵
۲-۴-۳-۲ لامپ‌های موج رونده مارپیچ ۱۷
۲-۴-۴ اجزای لامپ موج رونده ۱۸
۲-۴-۴-۱ تفنگ الکترونی ۱۹
۲-۴-۴-۲ موجبرهای وارد کننده و خارج کننده سیگنال RF ۲۴
۲-۴-۴-۳ سیستم فوکوس مغناطیسی ۲۵
۲-۴-۴-۴ ساختار مدار موج آهسته ۳۵

۲-۴-۴-۵ جمع کننده ۴۱
۲-۴-۵ پارامترهای لامپ ۴۱
۲-۴-۵-۱ سرعت فازی موج ۴۱
۲-۴-۵-۲ امپدانس برهم‌کنش ۴۱
۲-۴-۵-۳ پارامتر بهره و بهره توان ۴۲
۲-۴-۵-۴ توان خروجی بیشینه و متوسط ۴۲
۲-۴-۶ افزایش دما در لامپ ۴۳
۲-۴-۷ تحلیل سرد و گرم لامپ ۴۳
۲-۴-۸ انواع روش‌های تحلیلی و عددی در مدل‌سازی برهم کنش موج و الکترون ۴۴
۲-۴-۸-۱ تحلیل سیگنال کوچک ۴۴
۲-۴-۸-۲ تحلیل سیگنال بزرگ ۴۴
۲-۴-۸-۳ شبیه‌سازی کامپیوتری ۴۶
۲-۴-۸-۴ تکنیک انتگرال گیری محدود (FIT) ۴۷
۲-۴-۹ مروری برتحقیقات گذشته ۵۰

فصل سوم: روش تحقیق

۳-۱ نرم‌افزار شبیه‌سازی CST STUDIO SUITE ۵۸
۳-۱-۱ روش های مش بندی در CST ۵۹
۳-۱-۲ پارامترهای مش بندی ۶۰
۳-۱-۳ مراحل شبیه‌سازی ۶۰
۳-۱-۴ ماژول‌های CST ۶۰
۳-۱-۴-۱ ماژول مایکروویو ۶۱
۳-۱-۴-۲ ماژول الکترومغناطیس ۶۲
۳-۱-۴-۳ ماژول Particle Studio (PS) ۶۳
۳-۱-۵ انواع مدل نشر الکترون ۶۵
۳-۱-۵-۱ انواع مدل نشر در حلال Tracking ۶۷
۳-۱-۵-۲ مدل‌های نشر PIC ۶۹
۳-۱-۶ شرایط مرزی ۷۰
۳-۱-۷ منابع خطا و عدم دقت ۷۲
۳-۱-۷-۱ خطاهای ناشی از عدم تطابق مدل شبیه‌سازی با واقعیت ۷۲
۳-۱-۷-۲ خطاهای ناشی از عدم دقت در شبیه‌سازی ۷۲
۳-۲ شبیه‌سازی و بررسی لامپ TWT ۷۳

۳-۲-۱ شبیه‌سازی مجموعه تفنگ الکترونی ۷۴
۳-۲-۱-۱ تنظیم واحدها ۷۴
۳-۲-۱-۲ مدل‌سازی ۷۵
۳-۲-۱-۳ تعریف خواص مواد ساختار و پس زمینه ۷۷
۳-۲-۱-۴ مش بندی، اعمال شرایط مرزی و حل ۷۸
۳-۲-۲ ساختار فوکوس مغناطیسی متناوب ۷۹
۳-۲-۲-۱ مدل‌سازی ۷۹
۳-۲-۲-۲ تعریف خواص مواد ساختار ۸۱
۳-۲-۲-۳ مش بندی، شرایط مرزی و حل ۸۱
۳-۲-۳ ترکیب ساختار تفنگ الکترونی و سیستم فوکوس جهت فوکوس پرتوی الکترونی ... ۸۳
۳-۲-۴ مجموعه لامپ TWT ۸۴
۳-۲-۴-۱. مارپیچ ۸۴
۳-۲-۴-۲ نگه‌دارنده ها و مواد جاذب ۸۶
۳-۲-۴-۳ منبع الکترونی ۸۸
۳-۲-۴-۴ پورت‌های ورودی و خروجی موج ۸۹
۳-۲-۴-۵ جمع‌کننده الکترون ۹۱
۳-۲-۴-۶ تست گرم ۹۱
۳-۲-۵ بررسی اثر دما بر میزان فوکوس مغناطیسی و شعاع پرتوی الکترونی ۹۴

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱ تفنگ الکترونی ۹۷
۴-۱-۱ تعداد ذرات ساطع شده ۹۷
۴-۱-۲ جریان پرتو ۹۷
۴-۱-۳ دانسیته جریان سطحی ۹۸
۴-۱-۴ تعداد تکرار در شبیه‌سازی ۹۸
۴-۱-۵ توزیع دانسیته انرژی الکتریکی ۹۹
۴-۱-۶ میدان الکترواستاتیکی ۹۹
۴-۱-۷ پروفایل پرتوی الکترونی ۱۰۱
۴-۱-۸ اندازه‌گیری شعاع پرتو ۱۰۲
۴-۱-۹ اثر ولتاژ بر پرتو ۱۰۳
۴-۲ ساختار فوکوس مغناطیسی متناوب ۱۰۵
۴-۲-۱ توزیع میدان مغناطیسی ۱۰۵

۴-۳ مجموعه تفنگ الکترونی و سیستم فوکوس مغناطیسی ۱۰۸
۴-۳-۱ دانسیته انرژی مغناطیسی ۱۰۸
۴-۳-۲ توزیع میدان مغناطیسی B و H ۱۰۹
۴-۳-۳ توزیع میدان الکتریکی ۱۱۴
۴-۳-۴ جریان، دانسیته جریان و تعداد الکترون ساطع شده ۱۱۴
۴-۳-۵ پروفایل پرتوی الکترونی ۱۱۵
۴-۳-۶ توزیع الکترون‌ها و شعاع پرتو ۱۱۷
۴-۳-۷ اثر افزایش تعداد تناوب بر پروفایل پرتو ۱۲۰
۴-۴ ساختار موج آهسته ۱۲۱
۴-۴-۱ تست سرد ۱۲۱
۴-۴-۲ آنالیز انتقال پورت‌ها ۱۲۴
۴-۴-۳ تست گرم ۱۲۵
۴-۴-۳-۱ پروفایل پرتو و سیگنال رادیویی پس از برهم‌کنش ۱۲۶
۴-۴-۳-۲ جریان و توان خروجی در جمع کننده ۱۳۰
۴-۴-۳-۳ اثر ثابت دی‌الکتریک ۱۳۲
۴-۴-۳-۴ مقایسه نتایج ۱۳۳
۴-۴-۴ اثر دما بر روی میدان مغناطیسی، پروفایل و شعاع پرتو ۱۳۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری

۵-۱ یافته‌ها ۱۳۹
۵-۲ پیشنهادها ۱۴۱
فهرست منابع ۱۴۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱. خواص فیزیکی و حرارتی مغناطیس ساماریوم-کبالت ۳۳
جدول ۳-۱. انواع مدل‌های نشر در دو ماژول TRACKING و PIC. ۶۶
جدول ۳-۲. انواع مرزها و مشخصه آن‌ها. ۷۱
جدول ۳-۳. ابعاد و ولتاژ تفنگ الکترونی. ۷۶
جدول ۳-۴. ابعاد سیستم فوکوس مغناطیسی ۸۰
جدول ۳-۵. مقادیر مغناطیدگی پسماند (B_R) برای مگنت‌های مغناطیسی بر حسب گاوس ۸۱
جدول ۳-۶. ابعاد مارپیچ. ۸۶
جدول ۳-۷. ضریب اتلاف در مواد جاذب. ۸۷
جدول ۳-۸. ابعاد نهایی پورت مورد استفاده در مراحل بعدی شبیه‌سازی بر حسب میلیمتر. ... ۹۱
جدول ۴-۱. میدان مغناطیسی محوری در مرکز یک مگنت و در ترکیب با سیستم. ۱۱۲
جدول ۴-۲. ابعاد مارپیچ. ۱۲۳
جدول ۴-۳. ابعاد بهینه پورت. ۱۲۵
جدول ۴-۴. ماکزیمم میدان مغناطیسی و شعاع پرتو در دماهای مختلف. ۱۳۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱. طیف الکترومغناطیس بر حسب طول موج و فرکانس. ۵
شکل ۲-۲. طرح‌های باند مایکروویو قدیمی و جدید بر حسب فرکانس ۶
شکل ۲-۳. طبقه بندی انواع لامپ‌های مایکروویو ۹
شکل ۲-۴. انواع لامپ‌های مایکروویو بر حسب توان خروجی و فرکانس ۹
شکل ۲-۵. محدوده کاربردهای لامپ‌های مایکروویو و تجهیزات حات جامد ۱۰
شکل ۲-۶. نمای کلی از مدار برهم‌کنش دو بعدی در لامپ نوع O ۱۰
شکل ۲-۷. خانواده لامپ‌های پرتوی خطی ۱۱
شکل ۲-۸. ساختمان کلی کلایسترون ۱۱
شکل ۲-۹. ساختمان کلی لامپ موج رونده ۱۲
شکل ۲-۱۰. اجزای یک تیوب موج رونده خطی (TWT). ۱۳
شکل ۲-۱۱. شمایی از مدار برهم‌کنش سه بعدی پرتوی الکترونی و موج در تجهیزات نوع M.. ۱۳
شکل ۲-۱۲. تقویت‌کننده مارپیچی ارائه شده در طرح‌های ایالات متحده توسط پیرس ۱۵
شکل ۲-۱۳. انواع ساختار موج آهسته با حفره‌های زوج شده ۱۶
شکل ۲-۱۵. دو ساختار مشتق یافته از مارپیچ ۱۷
شکل ۲-۱۶. قسمت‌های مختلف لامپ موج رونده مارپیچ ۱۸
شکل ۲-۱۷. الف) اجزای تفنگ الکترونی با دو آند. ب) اعمال پتانسیل‌ها در تفنگ. ۱۹
شکل ۲-۱۸. الف) نواحیِ تفنگ پیرس. ب) خطوط هم پتانسیل ۱۹
شکل ۲-۱۹. استفاده از آند ثانویه برای کنترل جریان. ۲۰
شکل ۲-۲۰. الف) ناحیه ۱ در نزدیک کاتد ب) تاثیر الکترون‌ها بر تغییر پتانسیل نزدیک کاتد... ۲۲
شکل ۲-۲۱. خلاصه مکانیزم‌های غالب در یک کاتد ترمیونیک ۲۴
شکل ۲-۲۲. الف) یک موج‌برهم محور ب) انتقال موج ازخط انتقال هم‌محور به مارپیچ. ۲۴
شکل ۲-۲۳. مراحل جایگزینی سیستم متناوب فوکوس به جای تک مغناطیس ۲۶

شکل ۲-۲۴. فوکوس پرتوی الکترونی توسط میدان ناشی از مغناطیس‌های دائم متناوب ۲۶
شکل ۲-۲۵. مولفه محوری میدان مغناطیسی فوکوس در صورت عدم بهینه سازی ۲۷
شکل ۲-۲۶. الف) موجی شدن و ب) کپه ای شدن پرتوی الکترونی ۲۹
شکل ۲-۲۷. ساختمان تفنگ الکترونی و مانع قطبی مغناطیسی برای ایجاد شرایط بریلیون ... ۲۹
شکل ۲-۲۸. مشکلات جریان پرتوی الکترونی در فوکوس بریلیون ۳۰
شکل ۲-۲۹. ساختمان تفنگ برای ایجاد شرایط فوکوس غوطه‌وری ۳۱
شکل ۲-۳۰. میدان مغناطیسی در سیستم فوکوس غوطه‌وری ۳۱
شکل ۲-۳۱. میزان استفاده از انواع مختلف مغناطیس‌های نرم و سخت ۳۲
شکل ۲-۳۲. رینگ‌های ساماریوم-کبالت ۳۳
شکل ۲-۳۳. رفتار مغناطیدگی و مغناطیس زدایی مغناطیس SmCo5 ..... ۳۵
شکل ۲-۳۴. انواع ساختار موج آهسته ۳۶
شکل ۲-۳۵. مشخصه‌های مارپیچ ۳۶
شکل ۲-۳۶. تغییر سرعت فازی با فرکانس برای یک مارپیچ بدون کنترل پراکندگی ۳۷
شکل ۲-۳۷. امپدانس مارپیچ برای یک TWT با پهنای باند یک اکتاو ۳۸
شکل ۲-۳۸. الف) نگه‌دارنده‌های مارپیچ میله‌ای. ب) شمایی از ساختار موج آهسته مارپیچی .. ۳۸
شکل ۲-۳۹. فیلم تضعیف‌کننده پر اتلاف استفاده شده در مارپیچ ۳۹
شکل ۲-۴۰. دسته ای شدن الکترونها توسط میدان الکتریکی محوری ۴۰
شکل ۲-۴۱. جمع‌کننده در یک لامپ خطی ۴۱
شکل ۲-۴۲. مش‌بندی و موقعیت بردارها ۴۸
شکل ۲-۴۳. گسسته‌سازی فضایی معادلات ماکسول ۴۸
شکل ۲-۴۴. مقایسه روش های المان محدود، انتگرال محدود و تفاضل محدود حوزه زمان ۴۹
شکل ۲-۴۵. شبیه‌سازی مسیر حرکت الکترون در PPM توسط ماتسوزاوا در سال ۱۹۸۶ ..... ۵۰
شکل ۲-۴۶. الف) پروفایل پرتو در طول لامپ. ب) توزیع میدان مغناطیسی محوری. ۵۰
شکل ۲-۴۷. نمودار توان خروجی بر حسب ورودی در شبیه‌سازی و آزمایشگاه ۵۱
شکل ۲-۴۸. توزیع میدان برحسب ضخامت لوله آب‌گرد ۵۲
شکل ۲-۴۹. نمای سه بعدی CCTWT و پروفایل حرکت پرتو در برهم‌کنش با موج. ۵۲
شکل ۲-۵۰. الف) ساختار هیبریدی PPM ب) توزیع میدان محوری ۵۳
شکل ۲-۵۱. فاکتورهای تاثیرگذار بر ماکزیمم میدان: الف) دوره تناوب. ب) شعاع داخلی ۵۳
شکل ۲-۵۲. الف) سطح مقطع‌های مختلف از رینگ مغناطیسی باز. ب) توزیع میدان محوری . ۵۴
شکل ۲-۵۳. سیگنال ورودی و خروجی تقویت یافته ۵۴
شکل ۲-۵۴. الف) TWT در نرم‌افزار CST ب) مسیر الکترون‌ها در تفنگ ج) موج خروجی..... ۵۵
شکل ۲-۵۵. الف) رشد توان RF در لامپ. ب) متوسط انرژی جنبشی الکترون‌ها. ۵۶

شکل ۲-۵۶. الف) بهره دیفرانسیلی سیگنال کوچک ب) نمودار هم‌گرا شدن توان خروجی ۵۶
شکل ۳-۱. مش‌بندی یک پیچه از مارپیچ در الف) المان محدود ب) انتگرال‌گیری محدود ۵۸
شکل ۳-۲. طرح زمانی حلقه جهش برای متغیرها ۶۲
شکل ۳-۳. اصول PIC ۶۴
شکل ۳-۴. اصول حلال GUN TRACKING ۶۵
شکل ۳-۵. دو نمونه منبع نقطه‌ای و سطحی ۶۶
شکل ۳-۶. مش‌بندی سطح نشر ذرات ۶۶
شکل ۳-۷. تغییر پتانسیل نزدیک منبع نشر در شرایط محدود کننده بار فضایی. ۶۷
شکل ۳-۸. الف) ایجاد سطح مجازی در اطراف سطح کاتد. ب) مدل لانگمور- چایلد ۶۷
شکل ۳-۹. توزیع سرعت ذرات در دو دمای ۳۰۰ و ۹۰۰ درجه کلوین ۶۹
شکل ۳-۱۰. الف) مدل نشر گاوسی ذرات. ب) تابع نشر گاوسی ۶۹
شکل ۳-۱۱. کادر محاوره‌ای مربوط به تنظیمات نشر مستقیم ۷۰
شکل ۳-۱۲. افزایش تدریجی جریان در زمان خیزش T ۷۰
شکل ۳-۱۳. الف) انواع شرایط مرزی. ب) محدوده مرزی اعمال شده به یک مساله... ..... ۷۱
شکل ۳-۱۴. اجزای لازم TWT در شبیه‌سازی ۷۳
شکل ۳-۱۵. تعریف پیش‌فرض واحدها ۷۵
شکل ۳-۱۶. مقطعی از ساختار یک تفنگ الکترونی ۷۵
شکل ۳-۱۷. نماهای سه بعدی از مدل تفنگ الکترونی کامل و برش یافته ۷۶
شکل ۳-۱۸. توزیع پتانسیل در اجزای تفنگ ۷۷
شکل ۳-۱۹. الف) کادر تنظیمات پارامترهای مش‌بندی. ب) مدل مش‌بندی شده ۷۸
شکل ۳-۲۰. شرایط مرزی تفنگ الکترونی ۷۹
شکل ۳-۲۱. ساختار سیستم فوکوس مغناطیسی ۸۰
شکل ۳-۲۲. الف) نمایی از رینگ مغناطیسی و دو قطعه قطبی. ب) مقطع برش‌خورده ۸۰
شکل ۳-۲۳. نمای سه بعدی از سیستم فوکوس مغناطیسی مدل‌سازی شده. ۸۱
شکل ۳-۲۴. تنظیم پارامترهای مش‌بندی. ۸۲
شکل ۳-۲۵. مش‌بندی کل ساختار ۸۲
شکل ۳-۲۶. سیستم فوکوس مغناطیسی آماده برای حل ۸۲
شکل ۳-۲۷. نمای سه بعدی با الف) ۵۰ مگنت ب) ۳۰ مگنت ج) ۲۰ مگنت ۸۳
شکل ۳-۲۸. یک تک دور از مارپیچ. ب) تک دور مارپیچ با فضای داخلیِ خلاء ۸۵
شکل ۳-۲۹. بلوک سازنده مارپیچ (پررنگ) و مارپیچ حاصل از دوران این بلوک (کم‌رنگ). ۸۶
شکل ۳-۳۰. مارپیچ مدل‌سازی شده با ۲۱۹ دور ۸۶
شکل ۳-۳۱. ایجاد مواد جاذب بر روی نگه‌دارنده‌ها. ۸۷

شکل ۳-۳۲. مدل سه بعدی مارپیچ به همراه قسمت‌های تضعیف‌کننده بر روی نگه‌دارنده‌ها. .. ۸۷
شکل ۳-۳۳. مجموعه مارپیچ و نگه‌دارندها درون تیوب مسی ۸۸
شکل ۳-۳۴. منبع الکترونی مدل شده برای تولید پرتوی الکترونی معادل..... ۸۸
شکل ۳-۳۵. تنظیمات مربوط به منبع الکترونی ۸۹
شکل ۳-۳۶. موج‌برهای استوانه‌ای هم محور شبیه‌سازی شده ۸۹
شکل ۳-۳۷. نمای سه بعدی از پورت‌های ورودی و خروجی شبیه‌سازی شده. ۹۰
شکل ۳-۳۸. پورت ورودی (سمت چپ) و خروجی (سمت راست) مدل شده ۹۱
شکل ۳-۳۹. مدل جمع‌کننده در انتهای تیوب..... ۹۱
شکل ۳-۴۰. نمای سه بعدی از مدل لامپ آماده برای تست گرم..... ۹۲
شکل ۳-۴۱. بخشی از مدل مش‌بندی شده دو بعدی. ۹۳
شکل ۴-۱. تعداد ذرات ساطع شده از کاتد بر حسب زمان. ۹۷
شکل ۴-۲. جریان پرتوی الکترونی. ۹۸
شکل ۴-۳. دانسیته جریان ساطع شده از کاتد. ۹۸
شکل ۴-۴. تعداد تکرار شبیه‌سازی. ۹۹
شکل ۴-۵. توزیع دانسیته انرژی الکتریکی. ۹۹
شکل ۴-۶. پروفایل توزیع میدان الکتریکی در تفنگ الکترونی ۱۰۰
شکل ۴-۷. میدان الکتریکی در سه بعد و در خارج تفنگ ۱۰۰
شکل ۴-۸. پروفایل پرتوی الکترونی به‌دست آمده در سه بعد..... ۱۰۱
شکل ۴-۹. نحوه قرار دادن مانیتور ذرات در یک مکان از لامپ. ۱۰۲
شکل ۴-۱۰. پروفایل توزیع ذرات در الف) هنگام خروج از آند ب) کمر پرتو. ۱۰۳
شکل ۴-۱۱. جریان حاصل از اعمال اختلاف پتانسیل ۵۸۰۰ ولت..... ۱۰۴
شکل ۴-۱۲. توزیع ذرات در کمر پرتو در ولتاژ ۵۸۰۰ ولت..... ۱۰۴
شکل ۴-۱۳. مدل سیستم فوکوس مغناطیسی ۱۰۵
شکل ۴-۱۴. توزیع میدان مغناطیسی در سیستم فوکوس ۱۰۵
شکل ۴-۱۵. تراکم خطوط میدان در نزدیکی قطعات آهنی..... ۱۰۶
شکل ۴-۱۶. توزیع میدان مغناطیسی در یک رینگ مغناطیسی و دو قطعه قطبی. ۱۰۶
شکل ۴-۱۷. توزیع میدان مغناطیسی سه بعدی در اطراف یک رینگ..... ۱۰۶
شکل ۴-۱۸. میدان مغناطیسی در سطح رینگ‌های مغناطیسی و قطعات قطبی ۱۰۷
شکل ۴-۱۹. توزیع دانسیته انرژی مغناطیسی در مجموعه سیستم فوکوس..... ۱۰۸
شکل ۴-۲۰. میدان مغناطیسی در تفنگ الکترونی ۱۰۹
شکل ۴-۲۱. توزیع میدان محوری H داخل و خارج از سیستم فوکوس..... ۱۰۹
شکل ۴-۲۲. نمای سه بعدی از خطوط میدان داخل و خارج از سیستم..... ۱۱۰

شکل ۴-۲۳. توزیع میدان مغناطیسی: الف) در تک مگنت. ب) در محور سیستم فوکوس..... ۱۱۰
شکل ۴-۲۴. تغییرات میدان مغناطیسی محوری در جهت شعاعی ۱۱۲
شکل ۴-۲۵. میدان مغناطیسی شعاعی در جهت الف) شعاعی. ب) محوری ۱۱۳
شکل ۴-۲۶. توزیع خطوط میدان الکتریکی درسه بعد و در مقطع برش‌خورده از سیستم ۱۱۴
شکل ۴-۲۷. جریان پرتوی الکترونی دسته‌ای ۱۱۴
شکل ۴-۲۸. دانسیته جریان در طول لامپ ۱۱۵
شکل ۴-۲۹. تعداد الکترون‌های ساطع شده از سطح کاتد بر حسب زمان. ۱۱۵
شکل ۴-۳۰. پروفایل پرتوی الکترونی ۱۱۶
شکل ۴-۳۱. توزیع ذرات پرتو: الف) هنگام خروج از کاتد. ب) هنگام ورود به آند اولیه ۱۱۷
شکل ۴-۳۲. توزیع ذرات پرتو: الف) پس از خروج از آند اولیه. ب) پس از خروج از آند ثانویه. . ۱۱۸
شکل ۴-۳۳. توزیع ذرات پرتو: الف) در کمر پرتو. ب) در بدو ورود به تیوب ۱۱۸
شکل ۴-۳۴. توزیع ذرات پرتو در بدو ورود به قطعه قطبی. ۱۱۹
شکل ۴-۳۵. توزیع ذرات پرتو: الف) در یک قله از پرتوی موجی شکل. ب) در یک گره یا دره. ۱۱۹
شکل ۴-۳۶. پروفایل پرتوی الکترونی در سیستم فوکوس ۱۲۱
شکل ۴-۳۷. نمودار ثابت فازی موج بر حسب فرکانس ۱۲۲
شکل ۴-۳۸. نمودارهای پراکندگی برای شعاع‌های مختلف نگه‌دارنده..... ۱۲۲
شکل ۴-۳۹. نمودارهای حاصل از تست سرد. ۱۲۳
شکل ۴-۴۰. الف) سیگنال خروجی. ب) سیگنال برگشتی. ۱۲۴
شکل ۴-۴۱. نمودار اتلاف یا پارامتر S بر حسب فرکانس..... ۱۲۵
شکل ۴-۴۲. افت دامنه پرتوی واقعی پس از گذشت ۶ نانو ثانیه..... ۱۲۵
شکل ۴-۴۳. پروفایل پرتو در برهم‌کنش با موج در میدان متناوب مغناطیسی ۱۲۶
شکل ۴-۴۴. سیگنال ورودی و خروجی در لامپ با سیستم فوکوس مغناطیسی متناوب..... ۱۲۶
شکل ۴-۴۵. پروفایل پرتوی الکترونی در برهم‌کنش با موج و میدان ثابت مغناطیسی..... ۱۲۷
شکل ۴-۴۶. تقویت در میدان مغناطیسی ثابت ۱۲۷
شکل ۴-۴۷. تبدیل فوریه الف) موج ورودی. ب) موج خروجی. ج) موج برگشتی ۱۲۸
شکل ۴-۴۸. الف) سیگنال ورودی با دامنه ۰/۱.ب) تبدیل فوریه ۱۲۹
شکل ۴-۴۹. الف) سیگنال خروجی. ب) تبدیل فوریه ۱۲۹
شکل ۴-۵۰. الف) جریان برخوردی به جمع‌کننده. ب) تبدیل فوریه ۱۳۰
شکل ۴-۵۱. الف) نمودار توان بر حسب زمان. ب) نمودار تبدیل فوریه ۱۳۱
شکل ۴-۵۲. الف) توان پرتوی الکترونی در جمع‌کننده. ب) تبدیل فوریه..... ۱۳۱
شکل ۴-۵۳. سیگنال ورودی، برگشتی و خروجی و تبدیل فوریه آنها ۱۳۲
شکل ۴-۵۴. الف) توان خروجی پرتو. ب) تبدیل فوریه آن ۱۳۳

شکل ۴-۵۵. میدان مغناطیسی محوری و پرتوی الکترونی در دماهای مختلف ۱۳۵
شکل ۴-۵۶. تغییرات توزیع میدان مغناطیسی محوری ماکزیموم پرتو با دما..... ۱۳۶
شکل ۴-۵۷. تغییرات شعاع پرتو با دما..... ۱۳۶
شکل ۴-۵۸. پروفایل توزیع ذرات در فاصله ۲۹/۲۷ میلی‌متر و در دماهای مختلف ۱۳۷

فصل اول

مقدمه

لامپ‌های مایکروویو[1] در اواخر سال ۱۹۳۰ کشف شدند، ولی ارتقا و به‌روزرسانی آن‌ها تا سال ۱۹۹۰ ادامه یافت. این لامپ‌ها دستگاه‌های پیچیده‌ای هستند که برای طراحی و ساخت، نیاز به دانش فراوان در زمینه‌های مختلف مانند انتخاب مواد، خلاء، مغناطیس، مدارات مایکروویو و غیره دارند. هر چند در سال‌های اخیر تجهیزات حالت جامد[2] در بسیاری از کاربردها جایگزین لامپ‌های مایکروویو شده‌اند، اما این لامپ‌ها خواص منحصر به فردی دارند که توسط تجهیزات حالت جامد نمی‌تواند ایجاد شود؛ خصوصاً در کاربردهایی مانند رادارها، مخابرات، ارتباطات ماهواره‌ای و نظامی که نیازمند توان بالا، فرکانس بالا و پهنای باند وسیع هستند. بیش از پنجاه درصد فروش تجهیزات مایکروویو مربوط به لامپ موج رونده[3] TWT است که بهترین دستگاه برای تولید کارآمد توان مایکروویو در پهنای باند وسیع است. TWT در سال ۱۹۴۲ توسط رادولف کامپفنر[4] در انگلستان اختراع شد و در حال حاضر جایگاه خود را به عنوان یک دستگاه قوی با عمر مفید بالا و بازدهی[5] بالاتر از تقویت‌کننده‌های حالت جامدِ رقیب، ثابت کرده است. TWT یک دستگاه پیچیده و گران قیمت است که به طور مستقیم بر کیفیت ارتباطات، اطمینان، وزن و عمر یک ماهواره اثرگذار است. بررسی بر هم‌کنش پرتو و موج همیشه مساله‌ای پیچیده در حوزه TWT بوده است و به همین خاطر از تحلیل‌های کیفی و کمی جهت مطالعه این پدیده استفاده می‌شود. شبیه‌سازی نرم‌افزاری در حوزه TWT جهشی بزرگ بوده است. یک تحلیل سه بعدی می‌تواند جزئیات بیشتر و نتایج دقیق‌تری از عملکرد لامپ در کل پهنای باند برهم‌کنش و وابستگی آن به پارامترهای مختلف ورودی مانند ابعاد، مواد، اتصالات مکانیکی و غیره ارائه دهد. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری امکان ارتقای مداوم TWT از لحاظ افزایش بازدهی و توان، مهیا شده است. روش انتگرال‌گیری محدود، می‌تواند به عنوان یک روش عددی برای حل مسایلی که توسط روش‌های معمول تحلیلی غیر قابل حل به نظر می‌رسند، به کار گرفته شود. قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی، ارائه نتایج قابل اطمینان، کاهش

[1] Microwave tubes
[2] Solid state devices
[3] Travelling wave tube
[4] Rudolf Kompfner
[5] Efficiency

هزینه‌های سنگین آزمون‌های عملی و سرعت بالای روش در حل مسایل باعث گردیده است تا این روش جزء لاینفکی از پیشرفت صنعتی باشد. در میان نرم‌افزارهایی که از روش انتگرال‌گیری محدود[1] برای تحلیل مسایل مهندسی استفاده می‌نمایند، نرم‌افزار CST Studio Suite با قابلیت‌های منحصر به فرد خود توانسته است به عنوان یک نرم‌افزار بسیار قدرتمند و دقیق تحقیقاتی و کاربردی در صنعت و دانشگاه‌ها شناخته شود.

هدف از این پایان‌نامه شبیه‌سازی سه بعدیِ یک TWT مارپیچ مدل VE3Y003 است که پرونده و اطلاعات آن در صنایع قطعات الکترونیک ایران موجود است. این لامپ در فرکانس ۱۲-۸ گیگاهرتز یا باند X، ولتاژ ۵۵۰۰ ولت و جریان بین ۷۰-۶۰ میلی‌آمپر کار می‌کند. همچنین دارای توان خروجی اشباع ۳۰ تا ۵۰ وات، بازدهی ۱۵ تا ۲۵ درصد و بهره اشباع حدود ۴۷ دسی‌بل می‌باشد. بررسی پروفایل پرتوی الکترونی تحت فوکوس سیستم متناوب مغناطیسی، اثر دما بر روی میدان مغناطیسی و شعاع پرتو، بررسی برهم‌کنش پرتو و موج و تقویت موج خروجی و مقایسه نتایج با عمل و دیگر نرم افزارها از جمله اهداف شبیه‌سازی این لامپ در این پژوهش است. کلیه فرآیند شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار CST انجام شده است. توانایی‌هایی همچون ساخت سه بعدی اجزای ساختار TWT، داشتن ماژول PIC برای شبیه‌سازی و تحلیل مسیر پرتوی الکترونی تحت فوکوس مغناطیسی، امکان تحلیل برهم‌کنش پرتو و موج، در نظر گرفتن تمام نیروها و میدان‌های ذرات باردار و موج، امکان بهینه‌سازی پارامترهای مختلف به طور هم‌زمان و غیره، استفاده از CST را برای این تحقیق بی رقیب می‌سازد. نتایج این پایان‌نامه می‌تواند در طراحی و تحلیل لامپ‌های تقویت‌کننده موجود در صنایع مخابرات و الکترونیک به کار گرفته شود. در این پایان‌نامه قابلیت‌های گسترده‌تر نسخه ۲۰۱۱ نرم‌افزار شبیه‌سازی CST در حوزه مایکروویو و PIC نسبت به نسخه‌های پیشین معرفی خواهد شد؛ ویژگی‌هایی که منجر به شبیه‌سازی سه بعدیِ آسان و سریع‌تر این ادوات خواهد شد. از لحاظ ساختاری این تحقیق به پنج فصل کلی تقسیم می شود. فصل اول، هدف از انجام این پایان نامه را به طور خلاصه معرفی نموده و جنبه‌های اهمیت آن را بیان می نماید. پایه‌ها و مبانی تئوری تحقیق در فصل دوم شرح داده شده است. در فصل سوم روش انجام تحقیق بیان می‌شود. در فصل چهارم نتایج حاصله بحث خواهد شد و در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

[1] Finite integration analysis