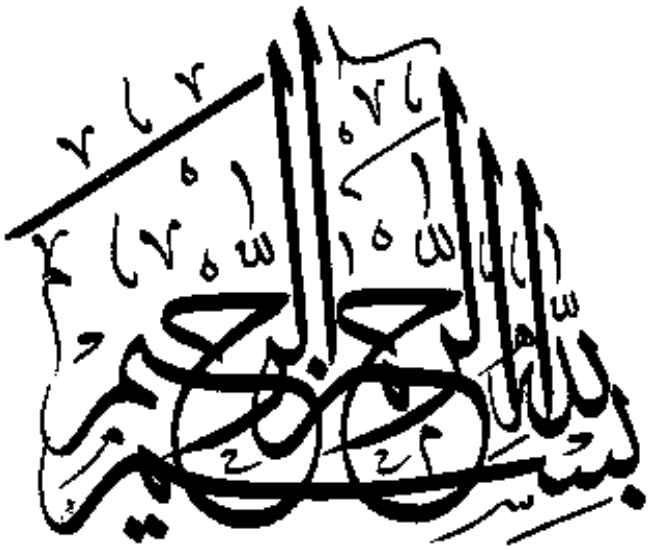
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله دکتری برق _ مخابرات

اثر تونل‌زنی فرا مواد بر انتشار موج در موجبر

توسط: **جعفر خلیل پور**

استاد راهنما: **دکتر محمد حکاک**

زمستان ۱۳۸۸

بسمه تعالي

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای **جعفر خلیل پور** رساله ۲۴ واحدی خود را **با عنوان اثر تونل زنی فراماواد بر انتشار موج در موجبر** در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۲۲ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی برق و کامپیوتر – مخابرات پیشنهاد می‌کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمد حکاک	استاد	
استاد ناظر	دکتر کیوان فرورقی	استاد	
استاد ناظر	دکتر زهرا اطلس باف	استادیار	
استاد ناظر	دکتر جلیل راشد محصل	استاد	
استاد ناظر	دکتر نصرت اله گرانپایه	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر زهرا اطلس باف	استادیار	

دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه:با عنایت به سیاست های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت وکرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی ومعنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح درمورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه وساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایید:

ماده۱: حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هر گونه بهره‌برداری ازآن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه‌ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسید ه و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هر گونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب جعفر جلیل پور دانشجوی رشته برق-مخابرات (میدان) مقطع دکتری

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: جعفر جلیل پور

تاریخ و امضا: ۱۳۸۸/۱۲/۱۲

تقدیم به

همسر مهربان

فرزند دلبند

مادر فداکار

و روح متعالی پدرم

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس به درگاه ایزد منان به سبب تمامی نعمتهایی که نصیب من نمود و مرا یاری کرد تا این مرحله از تحصیلم را به پایان برسانم.

در ابتدا وظیفه خود می‌دانم از زحمات و حمایتهای بی‌دریغ استاد راهنمای خویش جناب آقای دکتر محمد حکاک در طول تحصیل دوره دکتری و مدت زمان انجام این پایان نامه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از استاد ارجمند جناب آقای دکتر فرورقی که در انجام اندازه‌گیری‌های عملی این پایان نامه همکاری بی‌شائبه‌ای داشتند سپاسگزاری می‌نمایم.

تشکر و قدرانی خودم را به روح پدر و حضور مادرم تقدیم می‌دارم، که در طول زندگی همواره مشوق من بوده‌اند.

تشکر ویژه‌ای تقدیم همسر همیشه همراه و فرزند دلبندم می‌نمایم که همیشه مایه دلگرمیم بوده‌اند.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از اعضای هیات دوران آقایان دکتر جلیل راشد محصل، دکتر نصرت ا.. گرانپایه، دکتر کیوان فرورقی و سرکار خانم دکتر زهرا اطلس باف به جهت قبول زحمت داوری تحقیق حاضر تشکر و قدردانی نمایم.

لازم به ذکر است که این پایان نامه با حمایت مرکز تحقیقات مخابرات ایران به انجام رسیده است که لازم است از این مرکز به سبب این حمایتها تشکر نمایم.

چکیده

در این پایان‌نامه بکارگیری فرامواد در داخل موجبر رسانا مورد بحث قرار گرفته‌است. هدف اصلی از بکارگیری فرامواد در داخل موجبر بهبود عملکرد ادوات موجبری استفاده شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که با استفاده از این مواد می‌توان به فشرده سازی موجبر و ادوات موجبری پرداخت. همچنین می‌توان عملکرد ادوات موجبری را کنترل نمود و آنها را بصورت چند بانده بکار گرفته و بازه هریک از باندهای فرکانسی مورد استفاده را با تنظیم پارامترهای فیزیکی فراماده کنترل کرد.

در این پایان‌نامه بصورت یک کاربرد نوین، از حلقه‌های S شکل، به عنوان ماده MNG غیر همسانگرد تک محوری جهت عبور موج در زیر فرکانس قطع مود غالب موجبر استفاده شده است. در ادامه با بکارگیری این المان‌ها یک فیلتر میان نگذر موجبری که فرکانس قطع و پهنای باند آن قابل کنترل است، طراحی، تحلیل و شبیه سازی شده و همچنین بعد از ساخت پاسخ فرکانسی فیلتر اندازه‌گیری شده است. در ادامه نحوه کنترل فرکانس قطع و پهنای باند فیلتر با تنظیم پارامترهای ماده زمینه و ابعاد فیزیکی المان فراماده S شکل، مورد بحث قرار گرفته است. همچنین با بکارگیری یک تیغه فراماده از المانهای S شکل داخل هر یک از سه بازوی تشکیل دهنده یک اتصال T صفحه E موجبری به کمک شبیه سازی و اندازه‌گیری عملی نشان داده شده است که علاوه بر فشرده سازی این قطعه، می‌توان از آن به عنوان مقسم توان دو بانده استفاده کرد. محدوده هر یک از دو باند فرکانسی کارکرد ساختار با تنظیم ابعاد فیزیکی المانهای تشکیل دهنده فراماده و پارامترهای ماده زمینه، برد مورد استفاده در تیغه فراماده کنترل شده است. همچنین عرض باند توقف مابین دو باند عبور مقسم توان نیز بدین وسیله قابل تنظیم است.

کلمات کلیدی: فراماده، تونل‌زنی، حلقه شکافدار، SRR

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم : فرا مواد و موجبرهای بار گذاری شده با آنها ۶

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ معرفی فرا مواد ۷

۲-۲-۱ دسته بندی مواد بر حسب μ و ε ۷

۲-۲-۲ محیط ENG(Epsilon Negative) ۸

۲-۲-۳ محیط MNG (Mu Negative) ۱۰

۲-۲-۴ محیط DNG (Double Negative) ۱۳

۲-۳ محاسبه ε و μ موثر فرا مواد ۱۶

۲-۳-۱ استفاده از مقادیر متوسط میدانهای‌الکترومغناطیس برای بدست آوردن ε_{eff} و μ_{eff} ۱۶

۲-۳-۲ بدست‌آوردن مقایر Magnetization و Polarization وسپس اشتقاق ε_{eff} و μ_{eff} ۱۷

۲-۳-۳ اشتقاق ε_{eff} و μ_{eff} از مقایر n , Z یا ماتریس پراکندگی ۱۸

۲-۴ پارامترهای موج در محیط فرا ماده DNG ۱۹

۲- ۵ موجبرهای بارگذاری شده با فرامواد ۲۲

۲-۵-۱ موجبر با صفحات موازی بار گذاری شده توسط فرا ماده ۲۳

۲-۵-۱-۱ تحلیل تئوری موجبر با صفحات موازی بار گذاری شده توسط فرا ماده ۲۳

۲-۵-۱-۲ مدل مداری موجبر باصفحات موازی بارگذاری شده توسط فرا ماده ۲۷

۲-۵-۲ موجبر مستطیلی پر شده از فرا ماده ۳۰

۲-۵-۲-۱ تحلیل تئوری موجبر مستطیلی پر شده از فرا ماده ۳۰

۲-۵-۲-۲ مدل مداری موجبر مستطیلی بار گذاری شده با فرا ماده ۳۳

۲-۶ نتایج عملی حاصل از بارگذاری موجبر مستطیلی با فرا مواد ۳۶

۲-۶-۱ بارگذاری موجبر مستطیلی با ماده همسانگرد دو بعدی ENG ۳۶

۲-۶-۲ بارگذاری موجبر مستطیلی با ماده همسانگرد دو بعدی MNG ۳۷
۲-۶-۳ بارگذاری موجبر مستطیلی با ماده MNG دو بعدی تک محوری..... ۳۸
۲-۶-۴ بارگذاری موجبر مستطیلی با ماده همسانگرد دو بعدی DNG ۴۲
۲-۷ نتیجه‌گیری ۴۳
فصل سوم- پدیده تونل زنی در موجبر بار گذاری شده توسط فرا مواد ۴۵
۳-۱ مقدمه..... ۴۵
۳-۲ لنز کامل (perfect lens) ۴۶
۳-۳ پدیده تونلزنی در موجبر ۴۸
۳-۳-۱ استفاده از فرا مواد همسانگرد در تونل زنی..... ۵۰
۳-۳-۲ استفاده از فرا مواد غیر همسانگرد در تونل زنی..... ۵۲
۳-۴ نتیجه‌گیری ۵۴
فصل چهارم- المانهای S شکل به عنوان فراماده MNG غیر همسانگرد تک محوری ۵۵
۴-۱ مقدمه..... ۵۵
۴-۲ روش ماتریس انتقال در تحلیل ساختارهای حاوی فرا ماده ۵۶
۴-۳ تحلیل موجبر پر شده با ماده DNG همسانگرد..... ۵۷
۴-۴ المانهای S شکل به عنوان فرا ماده MNG غیر همسانگرد تک محوری ۵۹
۴-۵ مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری موجبر با انواع مختلف SRR ها..... ۶۳
۴-۶ بارگذاری موجبر باند X با المانهای S شکل MNG غیر همسانگرد تک محوری ۶۸
۴-۶-۱ تشریح ساختار مورد بررسی ۶۹
۴-۶-۲ شبیه سازی نرم افزاری ۷۰
۴-۶-۳ تحلیل تئوری ۷۱
۴-۶-۴ نتیجه عملی ارزیابی موجبر حاوی فرا ماده بشکل S ۷۲
۴-۶-۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی،تحلیل تئوری و اندازه‌گیری عملی ۷۴
۴-۷ نتیجه‌گیری ۷۴

فصل پنجم: فیلتر میان نگذر موجبر ی با قابلیت کنترل فرکانس قطع و پهنای باند قطع ۷۵

۵-۱ مقدمه ۷۵

۵-۲ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر موقعیت تیغه حاوی فرا ماده در داخل موجبر ۷۶

۵-۳ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر پارامترهای ماده زمینه ۷۷

۵-۳-۱ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر مقدار ضریب گذردهی ماده زمینه ۷۷

۵-۳-۲ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر ضخامت ماده زمینه ۷۸

۵-۴ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر ابعاد فیزیکی عناصر فراماده ۷۹

۵-۴ -۱ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر طول بازوهای المان S شکل ۸۰

۵-۴-۲ تنظیم پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر عرض خطهای المان S شکل ۸۱

۵-۵ جمع بندی نتایج تحلیل ۸۲

۵-۶ طراحی یک فیلتر نمونه ۸۴

۵-۷ نتیجه‌گیری ۸۵

فصل ششم: اتصال T موجبری بارگذاری شده با فرا ماده ۸۷

۶-۱ مقدمه ۸۷

۶-۲ بررسی اتصال Tدر غیاب فرا ماده ۸۸

۶-۳ بررسی اتصال T موجبری بار گذاری شده با فرا ماده ۹۰

۶-۳-۱ تشریح ساختار مورد بررسی ۹۰

۶-۳-۲ شبیه سازی نرم افزاری اتصال T حاوی فراماده ۹۱

۶-۳-۳ نتیجه انداز ه‌گیری عملی اتصال حاوی فراماده ۹۱

۶-۴ کنترل پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان موجبری ۹۳

۶-۴-۱ تغییر پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر پارامترهای ماده زمینه المانها ۹۴

۶-۴-۱-۱تنظیم پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر مقدار ضریب گذردهی ماده زمینه ۹۴

۶-۴-۱-۲ تنظیم پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر ضخامت ماده زمینه ۹۵

۶-۴-۲ تنظیم پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر موقعیت تیغه فرا ماده ۹۷
۶-۴-۳ تنظیم پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر ابعاد فیزیکی عناصر فراماده ۹۸
۶-۴ -۳-۱ تنظیم پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر طول بازوهای المان S شکل ۹۸
۶-۴-۳-۲ تنظیم پاسخ فرکانسی تقسیم کننده توان با تغییر عرض خطهای المان S شکل ۹۹
۶-۵ اتصال T با پاسخ نامتقارن ۱۰۰
۶-۶ جمع بندی نتایج تحلیل ۱۰۱
۶-۷ طراحی یک مقسم توان دو بانده نمونه ۱۰۳
۶-۸ نتیجه‌گیری ۱۰۵
فصل هفتم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۶
۷-۱ جمع بندی مطالب پایان نامه ۱۰۶
۷-۲ دستاوردهای پژوهشی ۱۰۸
۷-۳ مقالات منتشر شده ۱۰۹
۷-۴ پیشنهادات ۱۰۹
فهرست مراجع ۱۱۱
واژه نامه ۱۲۱

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱): تقسیم بندی مواد برحسب علامت ε و μ ۷

شکل (۲-۲): (a) آرایه‌ای از سیمهای موازی، متناوب.(b) سلول واحد.(c) ضریب گذردهی نسبی موثر ۸

شکل (۲-۳): نمونه ساختار سیمی متناوب ناپیوسته پیاده سازی شده برروی مدار چاپی ۱۰

شکل (۲-۴): مدل SRR ارائه شده استوانه‌ای برای μ_{eff} منفی ۱۱

شکل (۲-۵): نحوه تغییرات μ_{eff} با فرکانس ۱۱

شکل (۲-۶): شکل صفحه‌ای ساختار SRR ۱۲

شکل (۲-۷): ساختارهای SRR مربع شکل ۱۲

شکل (۲-۸): نحوه ترکیب ساختارها سیمی و SRR برای رسیدن به محیط DNG ۱۵

شکل (۲-۹): نتایج محاسبات ε و μ برای ساختار SRRs ۱۸

شکل (۲-۱۰): موقعیت بردارهای K, H ,E در محیطهای RH و LH ۲۱

شکل (۲- ۱۱): موجبر با صفحات موازی پر شده از دو لایه ماده ۲۴

شکل (۲-۱۲): نمودار پاشندگی برای موجبر بارگذاری شده با دو لایه DPS- DPS و DPS-DNG..... ۲۶

شکل (۲-۱۳): بردار پوئینتینگ در موجبر معمولی و موجبر بارگذاری شده با دو لایه DPS-DNG ۲۷

شکل (۲-۱۴): مدل مداری موجبر بارگذاری شده با دو لایه DPS- DPS و DPS-DNG ۳۰

شکل (۲-۱۵): موجبر مستطیلی پر شده از فرا مواد ۳۱

شکل (۲-۱۶): انتشار موج در موجبر بار گذاری شده با فرا ماده ۳۳

شکل (۲-۱۷): مدل مداری موجبر مستطیلی پر شده با فرا ماده ۳۴

شکل (۲-۱۸): موجبر مستطیلی پر شده با ماده ENG دو بعدی همسانگرد و s_{21} آن ۳۷

شکل (۲-۱۹): موجبر مستطیلی پر شده با ماده MNG دو بعدی همسانگرد و s_{21} آن ۳۸
شکل (۲-۲۰): موجبر مستطیلی پر شده با ماده MNG عرضی دو بعدی و s_{21} آن ۳۹
شکل (۲-۲۱): مقایسه فاز موج موجبر بارگذاری شده ماده MNG عرضی در زیر فرکانس قطع موجبر ۴۰
شکل (۲-۲۲): موجبر مستطیلی پر شده با حلقه‌های مسی دارای بار خازنی و s_{21} آن ۴۱
شکل (۲-۲۳): موجبر مستطیلی پر شده با ماده DNG دو بعدی همسانگرد و s_{21} آن ۴۲
شکل (۳-۱): لنز کامل با استفاده از فرا ماده ۴۷
شکل (۳-۲): یک نمونه صفحه‌ای دو بعدی از لنز کامل ۴۸
شکل (۳-۳): موجبر حاوی فرا ماده قرار گرفته بین دو موجبر خالی در حال قطع ۴۹
شکل (۳- ۴): دامنه میدان الکتریکی داخل ساختار شکل (۳-۳) در نواحی مختلف آن ۵۰
شکل (۳- ۵): دامنه میدان الکتریکی داخل ساختار شکل (۳-۳)باحذف موجبر انتهایی ۵۱
شکل (۳-۶): دامنه میدان الکتریکی داخل ساختار بازای مقادیر مختلف تانژانت تلف ۵۲
شکل (۳-۷): (a) سطح مقطع عمودی (b)ابعاد ساختار دو حلقه‌ای (c) سطح مقطع افقی ساختار ۵۳
شکل (۳-۸): اندازه ضریب انتقال اندازه‌گیری شده در ساختار آزمایش ۵۴
شکل (۴-۱): موجبر حاوی فرا ماده قرار گرفته بین دو موجبر خالی در حال قطع ۵۷
شکل (۴-۲): نتیجه بدست آمده از شبیه سازی سا ختار شکل ۴-۱ ..... ۵۸
شکل (۴-۳): نتیجه بدست آمده از شبیه سازی ساختار شکل ۴-۱ با دو موجبر انتهایی باند H ۵۹
شکل (۴-۴): المانهای فرا ماده S شکل ۶۰
شکل (۴-۵): مدل مداری المانهای S شکل ۶۲
شکل (۴-۶): المان فرا ماده S شکل گسترش یافته ۶۳
شکل (۴-۷): موجبر مربعی بارگذاری شده توسط مشددهای دایروی (الف) و نتیجه شبیه سازی (ب) ۶۵
شکل (۴-۸): موجبر مربعی بارگذاری شده توسط مشددهای S شکل (الف) و نتیجه شبیه سازی (ب) .. ۶۶
شکل(۴-۹): موجبر باند C بارگذاری شده توسط مشددهای دایروی (الف) و نتیجه شبیه سازی(ب) ۶۷
شکل (۴-۱۰): موجبر باند C بارگذاری شده توسط مشددهای S شکل (الف) و نتیجه شبیه سازی (ب) .. ۶۸
شکل (۴-۱۱): موجبر بار گذاری توسط تیغه فرا ماده از المانهایS شکل ۶۹

شکل (۴-۱۲): ابعاد سلول واحد (الف) تیغه فرا ماده و دستگاه مختصات بکار رفته(ب) ۷۰
شکل (۴-۱۳): نتیجه شبیه سازی ساختار شکل ۴-۱۱ با نرم افزار HFSS ۷۰
شکل (۴-۱۴): ضریب انتقال ساختار شکل ۴-۱۱ بدست آمده از روش ماتریس انتقال..... ۷۲
شکل (۴-۱۵): مجموعه موجبری ساخته شده (الف) ، در حال اندازه گیری (ب) ۷۳
شکل (۴-۱۶): نتیجه حاصل از اندازه‌گیری عملی ساختار شکل ۴-۱۵. ..... ۷۳
شکل (۴-۱۷): مقایسه نتایج شبیه‌سازی،تحلیل تئوری و اندازه‌گیری عملی ساختار شکل ۴-۱۵ ..... ۷۴
شکل (۵-۱): تغییر پاسخ فرکانسی فیلتر باتغییر فاصله تیغه فرا ماده از محور مرکزی موجبر ۷۶
شکل (۵-۲): تغییر پاسخ فرکانسی فیلتر باتغییر ضریب گذردهی ماده زمینه ۷۸
شکل (۵-۳): تغییر پاسخ فرکانسی فیلتر باتغییر ضخامت فیزیکی ماده زمینه..... ۷۹
شکل (۵-۴): مشخصات سلول واحد بکار رفته در شبیه‌سازی ۸۰
شکل (۵-۵): تغییر پاسخ فرکانسی فیلتر باتغییر طول بازوهای المان S شکل ۸۱
شکل (۵- ۶): تغییر پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر عرض خطهای المان S شکل ۸۲
شکل (۵-۷): پاسخ فرکانسی فیلتر طراحی شده ۸۵
شکل (۶-۱): اتصال T موجبری با دیافراگم سلفی ۸۸
شکل (۶-۲): ضریب انتقال$S_{۱۲}$ و$S_{۱۳}$،اتصالT بدون حضور فرا ماده ۸۹
شکل (۶-۳): ضریب انتقال$S_{۱۲}$ و$S_{۱۳}$،اتصالT بدون فرا ماده، با دیواره جابجا شده ۸۹
شکل (۶-۴): اتصال T بارگذاری با فرا ماده ۹۰
شکل (۶-۵): ضریب انتقال$S_{۱۲}$ و$S_{۱۳}$،شبیه سازی شده اتصالT بارگذاری شده با فرا ماده ۹۱
شکل (۶-۶): اتصال T بارگذاری با فرا ماده در حال اندازه گیری ۹۲
شکل(۶-۷): ضریب انتقال$S_{۱۲}$ و$S_{۱۳}$،اندازه‌گیری شده اتصالT بارگذاری شده با فرا ماده ۹۲
شکل (۶-۸): مقایسه نتایج شبیه سازی و اندازه‌گیری عملی اتصالT بارگذاری شده با فرا ماده ۹۳
شکل (۶-۹): تغییر پاسخ فرکانسی اتصال T باتغییر ضریب گذردهی ماده زمینه ۹۵
شکل (۶-۱۰): تغییر پاسخ فرکانسی اتصال T باتغییر ضخامت فیزیکی ماده زمینه ۹۶
شکل (۶-۱۱): تغییر پاسخ فرکانسی اتصال T باتغییر فاصله تیغه فرا ماده از محور موجبرها ۹۷

شکل (۶-۱۲): تغییر پاسخ فرکانسی اتصال T باتغییر طول بازوهای المان S شکل ۹۹
شکل (۶-۱۳): تغییر پاسخ فرکانسی اتصال T با تغییر عرض خطهای المان S شکل ۱۰۰
شکل (۶-۱۴): پاسخ فرکانسی نامتقارن اتصال T با حذف تیغه فرا ماده در بازوی ۳ ..... ۱۰۱
شکل (۶-۱۵): پاسخ فرکانسی اتصال اتصال T طراحی شده ۱۰۵

فهرست جداول

جدول (۲-۱): مدل مداری انتشار موج محیطهای مختلف ۲۹
جدول (۲-۲): مقایسه مدل خط انتقالی موجبر پرشده با مواد مختلف ۳۶
جدول (۵- ۱): نحوه تغییر پاسخ فرکانسی فیلتر با تغییر پارامترهای ساختار فیلتر ۸۳
جدول (۶-۱): نحوه تغییر پاسخ فرکانسی اتصال T با تغییر پارامترهای ساختار ۱۰۲

فصل اول

مقدمه

فراماواد[۱] ساختارهای متناوب جدیدی هستند که در سال‌های اخیر به دلیل خواص و کاربردهای متنوع بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. کلمه Metamaterial از دو کلمه یونانی meta به معنای فوق و فرا و material به معنای ماده تشکیل شده‌است و اشاره به مواد بطور موثر همگنی دارد که به صورت طبیعی موجود نیستند و می‌بایست به صورت مصنوعی ساخته‌شوند. در فراماواد قسمت حقیقی حداقل یکی از دو ضریب μ و ε منفی است. بصورت ساده می‌توان گفت فراماواد از تزریق ناخالصی بداخل یک ماده میزبان بوجود می‌آیند. در بکارگیری فراماواد رفتار آن‌ها از دیدگاه ماکروسکپی مورد توجه است، بنابراین لازم است ابعاد ناخالصی و فواصل آن‌ها (تناوب تکرارشان) نسبت به طول موج خیلی کوچکتر باشد تا بتوان از مفهوم μ و ε موثر مواد همگن استفاده کرد. به بیان دیگر برای اطمینان از اینکه پدیده شکست[۲] بر پدیده پراش/تفرق[۳] موج در حال انتشار در ساختار فراماده غالب است، باید متوسط اندازه سلول واحد این ساختار از ربع طول موج هدایت شده کوچکتر باشد. شرط $p = \frac{\lambda_g}{4}$ را شرط همگنی یا حد همگنی موثر می‌نامند.

استفاده از موجبر به‌عنوان یک ساختار پایه‌ای انتشار امواج الکترومغناطیس قدمت بسیار طولانی دارد و در کاربردهایی نظیر رادار، تغذیه آنتن‌های بازتابی، تغذیه آنتن‌های آرایه‌ای بزرگ و ساخت آنتن‌های بوقی برای کاربردهای توان بالا، استفاده از موجبر مرسوم بوده و به‌عنوان یک المان پایه محسوب می‌شود. موجبرها دارای رفتار بالاگذر هستند و حجم ادوات موجبری ساخته شده نسبتا بزرگ است.

۱-Metamaterials

۲- Refraction

۳-Scattering/Diffraction

در تحقیقات انجام شده در زمینه بکارگیری فراماده در داخل موجبر که بطور عمده توسط دو گروه هاربار [35-32] در دانشگاه زاگرب و مارکوس [64-63] در دانشگاه سویل و تقریبا بطور همزمان انجام شده است، امکان بکارگیری فراماده در داخل موجبر بررسی شده است. در [32,63] یک تیغه از حلقه‌های شکافدار بعنوان المان‌های ماده MNG[1] غیر همسانگرد تک محوری با فرکانس تشدید کمتر از فرکانس قطع یک موجبر با سطح مقطع مربعی بکار گرفته شده است. از خاصیت تقویت مودهای میرا شونده برای عبور موج در زیر فرکانس قطع بهره گرفته شده و از این پدیده برای فشرده سازی ابعاد موجبر استفاده شده است. در [33]خواص تشعشعی موجبر بارگذاری شده با مواد ENG[2]، MNG، DNG[3] همسانگرد و MNG غیر همسانگرد تک محوری بعنوان آنتن مورد بحث قرار گرفته است. اما در تحقیق‌های ذکر شده بدلیل تشدیدی بودن حلقه‌های شکاف‌دار پهنای باند عبوری در زیر فرکانس قطع باریک بوده و بدلیل تلفات بالای این عناصر، دامنه موج عبوری پایین (حدود ۳۰ dB-) است. بنابراین ساختار دارای کاربرد عملی چندانی نیست. در [63] موجبر بارگذاری شده با فراماده بعنوان یک ساختار تونل‌زنی مطرح شده است. فراماده‌ای با فرکانس تشدید بالاتر از فرکانس قطع موجبر مورد استفاده قرار گرفته است . در این حالت یک باند توقف در بازه منفی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ایجاد می‌شود. با توجه به تشدیدی بودن این عناصر در این وضعیت نیز باند توقف دارای پهنای کمی است. همچنین در هیچ یک از تحقیق‌های مذکور تلاشی برای کنترل رفتار ساختار موجبری صورت نگرفته است.

فراماد این پتانسیل را دارند که علاوه بر کوچک کردن ادوات موجبری، به منظور چند بانده کردن آن‌ها و همچنین کنترل باندهای فرکانسی بکارگیری این ادوات، مورد استفاده قرار گیرند. هدف اصلی

۱-Mu negative

۲-Epsilon negative

۳-double negative

این پایان‌نامه مطالعه و بررسی اثر بکارگیری فراماده در خواص انتقالی و تشعشعی موجبر مستطیلی است. در این راستا مسایل زیر بررسی می شوند:

الف – بررسی تئوری موجبرهای پر شده از فراماد و امکان انتشار موج در آن‌ها.

ب- بررسی امکان فشرده سازی موجبر و ادوات موجبری با استفاده از بکارگیری فراماده در داخل آن‌ها.

ج- بررسی امکان چند بانده کردن ادوات موجبری با استفاده از بکارگیری فراماده در داخل آن‌ها.

د- ارائه نمونه کاربردی از کنترل پاسخ فرکانسی ادوات موجبری (فیلتر و اتصال **T** موجبری) حاوی فراماده.

ه- مطالعه نحوه کنترل پاسخ فرکانسی ادوات موجبری با تغییر پارامترهای فراماده.

این پایان‌نامه در هفت فصل تهیه شده است. فصل اول مقدمه است که در آن به ضرورت انجام این تحقیق پرداخته شده و با توجه به اینکه هر فصل مقدمه مخصوص به خود را دارد، این فصل به اختصار نوشته شده و از ذکر جزئیات پرهیز شده است. در فصل دوم و سوم به مرور تحقیق‌های قبلی پرداخته شده و فصل‌های چهارم تا ششم مربوط به کارهای صورت گرفته در تحقیق حاضر است.

در فصل دوم علاوه بر ذکر تاریخچه پیدایش فراماد ENG، MNG و DNG ، به بررسی و حل معادله موج در داخل موجبر بارگذاری شده با فراماده پرداخته شده است . در این فصل امکان انتشار موج در داخل موجبر در حضور مواد ENG، MNG، DNG همسانگرد و MNG غیر همسانگرد تک محوری بررسی و مدل مداری برای آن‌ها ارائه می‌شود . همچنین نتایج عملی حاصل از بارگذاری موجبر با این مواد ارائه می‌شود.

درفصل سوم پدیده تونل‌زنی در موجبر بارگذاری شده با فراماده معرفی شده و نحوه استفاده از فراماد همسانگرد و غیر همسانگرد در تونل‌زنی بحث شده است. در این فصل ابتدا پدیده تونل‌زنی معرفی و استفاده از آن در ساخت لنز کامل تشریح شده است. در ادامه موجبر بارگذاری شده با فراماده بعنوان

یک ساختار تونل‌زنی مطرح شده است. همچنین با استفاده از ماتریس انتقال شرط بروز تونل‌زنی کامل در موجبر تشریح شده است.

در فصل چهارم در یک کاربرد جدید، از حلقه‌های S شکل بعنوان ماده MNG غیر همسانگرد تک محوری برای عبور موج در زیر فرکانس قطع مود غالب موجبر استفاده شده است. در این فصل پس از مرور رفتار و مدل مداری المان S شکل، یک تیغه چاپ شده از این المان‌ها بعنوان ماده MNG غیر همسانگرد تک محوری برای بارگذاری یک موجبر باند X مورد استفاده قرار گرفته است. با ارائه نتایج تئوری، شبیه‌سازی رایانه‌ای و نتایج اندازه‌گیری عملی نشان داده شده است، که بدلیل تلفات عبوری کمتر و پهنای باند وسیع‌تر المان‌های S شکل، انتشار موج در یک باند فرکانسی عریض زیر فرکانس قطع مود غالب موجبر با دامنه بالایی صورت می‌گیرد.

در فصل پنجم ساختار مطرح شده در فصل قبل بعنوان یک فیلتر میان نگذر موجبری با فرکانس قطع و پهنای باند قطع قابل تنظیم در نظر گرفته شده است. در این فصل به بررسی کنترل عملکرد این فیلتر موجبری با تغییر پارامترهای ماده زمینه ، ابعاد فیزیکی المان‌ها و موقعیت تیغه حاوی فراماده در داخل موجبر می‌پردازیم. نشان داده شده است که علاوه بر پهنای باند قطع، فرکانس قطع فیلتر نیز با تنظیم ضخامت فیزیکی و ضریب گذردهی نسبی ماده زمینه برد فراماده و ابعاد فیزیکی المان‌ها قابل کنترل است. همچنین یک طراحی نمونه از فیلتر موجبری با توجه به نتایج تحلیل ارائه شده است.

در فصل ششم یک اتصال Tصفحه E موجبری، بارگذاری شده با ماده غیر همسانگرد تک محوری با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی عرضی موثر منفی با عناصر S شکل، مورد تحلیل قرار گرفته است. با ارائه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی نشان داده شده است که این ساختار را می‌توان بعنوان یک تقسیم کننده توان دو باندی مورد استفاده قرار داد. پهنای هر یک از این دو باند با تنظیم پارامترهای ماده زمینه ، ابعاد فیزیکی المان‌ها و همچنین موقعیت تیغه‌های فراماده در داخل هریک از موجبرها قابل کنترل است. حتی می‌توان این پارامترها را طوری تنظیم کرد که باند فرکانسی انتقال موج از درگاه