دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق – مخابرات (میدان)

تحلیل و شبیه‌سازی آنتن‌های تشدیدکننده دی-الکتریک با ساختارهای متامتریال و بهبود پارامترهای آن

به کوشش

امیدرضا میری

استاد راهنما

دکتر فرزاد مهاجری

بهمن ۱۳۹۲

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب امیدرضا میری (۹۰۰۷۱۰) دانشجوی رشته مهندسی برق گرایش مخابرات میدان دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز 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 پایان نامه‌ام 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: امیدرضا میری

تاریخ و امضاء:

به نام خدا

تحلیل و شبیه‌سازی آنتن‌های تشدیدکننده دی الکتریک با ساختارهای متامتریال و بهبود پارامترهای آن

به کوشش:

امیدرضا میری

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی برق (مخابرات)

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه، با درجه: بسیار خوب

دکتر فرزاد مهاجری، استادیار بخش مخابرات و الکترونیک (استاد راهنما) .....

دکتر علیرضا یاحقی ، استادیار بخش مخابرات و الکترونیک (استاد مشاور) .....

دکتر عباس علی‌قنبری ، استادیار بخش مخابرات و الکترونیک (استاد داور) .....

تقدیم به پدر و مادر دلسوز و مهربانم

آنان که زحماتشان

با هیچ واژه‌ای قابل قدردانی نیست.

پدرم راه تمام زندگیست پدرم دلخوشی همیشگیست

گلسار جاودانی مادر است چشم سار مهربانی مادر است

سپاسگزاری

اکنون که این پایان‌نامه به پایان رسیده است بر خود فرض می‌دانم از کلیه عزیزانی که مرا در این راه یاری دادند تشکر و قدردانی کنم. در ابتدا شکر خدا را به جا می‌آورم که تنها در سایه عنایت‌های بی‌دریغ او این پروژه به پایان رسید. از تمام خوانواده‌ام تشکر و قدردانی می‌کنم که همواره پشتوانه و دلگرمی برای من بودند و به خصوص از پدر و مادرم تشکر می‌کنم که تمام زندگی‌ام حمایتم کردند و عامل اصلی رسیدن من به این نقطه بودند. از استاد ارجمند جناب آقای دکتر فرزاد مهاجری کمال تشکر را دارم زیرا که در طول سال‌هایی که در خدمت ایشان بودم همواره به بنده لطف داشته‌اند ضمن اینکه در طول این پایان‌نامه نیز همواره با راهنمایی‌های خود راه را برای بنده هموار نمودند و تمامی امکانات مورد نیاز برای این پایان‌نامه را در اختیار بنده قرار دادند و همواره برای بنده قوت قلبی بودند. همچنین از جناب آقای دکتر علیرضا یاحقی که در طول این پایان‌نامه از هیچ کمکی برای بنده دریغ نکردند و هر زمان که نیاز به مشاوره داشتم با رویی باز بنده را می‌پذیرفتند و با راهنمایی خود سهم عمده‌ای را در به پایان رسیدن این پایان‌نامه ایفا کردند، کمال تشکر را دارم. و همچنین از جناب آقای دکتر عباس علی‌قنبری تشکر و قدردانی می‌کنم چرا که ایشان نیز با راهنمایی‌های خود کمک شایانی به پیشبرد این پایان نامه به بنده نمودند. و در آخر هم از کلیه عزیزان و دوستان به خصوص جناب آقای مهندس امیرحسین سقانژاد و همچنین جناب آقای مهندس امیر رضاقلی که بنده را در این راه یاری نمودند کمال تشکر را دارم.

چکیده

تحلیل و شبیه‌سازی آنتن‌های تشدیدکننده دی‌الکتریک با ساختارهای متامتریال و بهبود پارامترهای آن

به کوشش
امیدرضا میری

امروزه نیاز به سیستم‌های بی‌سیم با ابعاد کوچکتر و دارای بهره و بازده بیشتر روز به روز در حال افزایش است. بنابراین بهبود پارامترهای آنتن‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پایان‌نامه با بهره‌گیری از ساختارهای متامتریال بهبود پارامترهای آنتن‌های تشدیدکننده دی‌الکتریک مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا ضمن معرفی ساختارهای متامتریال و خصوصیات ویژه آن‌ها اقدام به طراحی سلول‌های متامتریال جدید نموده و چهار سلول متامتریال جدید در دو فرکانس ۳/۷ و ۱۰ گیگابایت طراحی شده است. سپس اثر استفاده از این سلول‌ها به صورت رولایه بر روی دو نوع آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک کروی و استوانه‌ای بررسی شده است.

در ابتدا اثر استفاده از سلول اول طراحی‌شده در فرکانس ۳/۷ بر روی رولایه آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک کروی بررسی شده و شبیه سازی شده که باعث افزایش بهره به اندازه ۲/۳۴ شده است، در حالی که پهنای باند تقریبا ثابت مانده است. سپس همین سلول در فرکانس ۱۰ طراحی شده و بر روی رولایه آنتن استوانه‌ای قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی برای این آنتن نشان می‌دهد که بهره آنتن به اندازه ۴/۱۴ افزایش داشته است.

پس از آن اثر دیگر سلول‌ها بر روی آنتن استوانه‌ای در فرکانس ۱۰ بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی برای سلول سوم افزایش بهره به مقدار ۱/۶۶ و برای سلول چهارم افزایش به اندازه ۱/۳۲را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک، بهره، پهنای باند، متامتریال

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱-مقدمه و مروری بر کارهای گذشته ۲

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۲-مروری بر کارهای گذشته ۴

فصل ۲-آنتن‌های تشدیدکننده دی‌الکتریک ۱۵

۲-۱-مقدمه ۱۵

۲-۲-روش‌های تغذیه آنتن‌های تشدیدکننده دی‌الکتریک ۱۹

۲-۳-تحلیل آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک ۲۱

۲-۳-۱-فرکانس رزونانس ۲۱

۲-۳-۲-امپدانس ورودی و فرکانس رزونانس ۲۵

فصل ۳-مروری بر تئوری متامتریال‌ها، ویژگی‌ها و کاربردهای آن‌ها ۲۹

۳-۱-مقدمه ۲۹

۳-۱-۱-معرفی متامتریال‌ها ۳۰

۳-۲-تاریخچه‌ی متامتریال ۳۱

۳-۳-نمایش تجربی مواد چپگرد ۳۴

۳-۳-۱-روش خط انتقالی ۳۸
۳-۳-۲-متامتریال‌های ترکیبی راستگرد/چپگرد (CRLH) ۴۰
۳-۴-اصول اساسی متامتریال‌ها ۴۲
۳-۴-۱-چپگردی به کمک معادلات ماکسول ۴۲
۳-۴-۲-شرایط آنتروپی در محیط‌های پاشنده ۴۵
۳-۴-۳-شرایط مرزی ۴۷
۳-۴-۴-معکوس شدن تشعشع واویلف- سرنکوف در مواد چپگرد [۲۳] ۴۹
۳-۴-۵-نقض قانون اسنل: شکست منفی ۵۰
۳-۵-مختصری از کاربردهای متامتریال ۵۲
۳-۵-۱-موجبر با ابعاد زیر طول موج ۵۴
۳-۵-۲-بهبود بازده آنتن دو قطبی کوچک توسط لایه‌های تو در توی ماده DNG. ۵۷
۳-۵-۳-کاربرد متامتریال در ایجاد لنز مسطح ۵۹
۳-۶-معرفی نمونه‌ای از متامتریال‌های اولیه ۶۱
۳-۶-۱-متامتریال‌های سیم‌های فلزی به عنوان محیط متامتریال ENG ۶۱
۳-۶-۲-آرایه SRR به عنوان متامتریال MNG ۶۳
۳-۶-۳-متامتریال‌های DNG ساخته شده از سیم‌های نازک فلزی و SRR ۶۵
۳-۷- استخراج پارامترهای محیطی ساختارهای متامتریال از روی پارامترهای پراکندگی (S) آنها ۷۰
۳-۷-۱-روش پارامتر S ۷۰

فصل ۴-معرفی ساختار فراماده جدید ۷۷
۴-۱-مقدمه ۷۷

۴-۲-ساختار فراماده اول ۷۸
۴-۳-ساختار فراماده دوم ۸۲
۴-۴-ساختار فراماده سوم ۸۶
۴-۵-ساختار فراماده چهارم ۹۰

فصل ۵-استفاده از متامتریال به عنوان رولایه آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک ۹۶
۵-۱-مقدمه ۹۶
۵-۲-استفاده از ساختار متامتریال اول به عنوان رولایه ۹۷
۵-۲-۱-آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک کروی با رولایه متامتریال ساختار اول ۹۷
۵-۲-۲-آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک استوانه‌ای با رولایه متامتریال ساختار اول ۱۰۰
۵-۲-۳-آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک استوانه‌ای با رولایه متامتریال ساختار سوم ۱۰۵
۵-۲-۴-آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک استوانه‌ای با رولایه متامتریال ساختار چهارم ۱۰۸

فصل ۶-نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۳
۶-۱-نتیجه‌گیری ۱۱۳
۶-۲-پیشنهادات ۱۱۴

فهرست منابع ۱۱۵

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- چند نمونه ماده دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک آن‌ها ۱۷

جدول ۲-۲- مقادیر فرکانس رزونانس اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده برای DRA استوانه‌ای ۲۷

جدول ۵-۱- مشخصات آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک کروی ۹۷

جدول ۵-۲- مشخصات آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک استوانه‌ای ۱۰۱

جدول ۵-۳- نتایج شبیه‌سازی‌های مربوط به بهره دو آنتن کروی و استوانه‌ای با آرایه‌ای از رولایه-های متشکل از چهار سلول متامتریال مختلف ۱۱۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- آنتن مایکرواستریپ در حضور سلول واحد SRR ۵

شکل ۱-۲- نمودار تلفات برگشتی آنتن با زیرلایه‌های مختلف ۵

شکل ۱-۳- سلول واحد متامتریال [۱۲] ۶

شکل ۱-۴- سلول واحد جهت استفاده در رولایه [۱۳] ۶

شکل ۱-۵- نمای کلی آنتن DRA استوانه‌ای با تغذیه خط مایکرواستریپ [۱۴] ۷

شکل ۱-۶- نمای کلی آنتن DRA استوانه‌ای با تغذیه کابل هم‌محور [۱۴] ۷

شکل ۱-۷- نمودار تلفات برگشتی مربوط به تغذیه با کابل هم‌محور [۱۴] ۸

شکل ۱-۸- نمودار تلفات برگشتی مربوط به تغذیه با خط مایکرواستریپ [۱۴] ۸

شکل ۱-۹- آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک استوانه‌ای یا تغذیه کابل هم‌محور [۱۵] ۹

شکل ۱-۱۰- نمودار تلقات برگشتی مربوط به آنتن DRA استوانه‌ای با تغذیه کابل هم‌محور [۱۵] ۹

شکل ۱-۱۱- بهره نرمالیزه آنتن DRA استوانه‌ای [۱۵] ۹

شکل ۱-۱۲- نمای آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک کروی با تغذیه کابل هم‌محور [۱۶] ۱۰

شکل ۱-۱۳- نمودار تلفات برگشتی q-HDRA ۱۰

شکل ۱-۱۴- تلفات برگشتی مربوط آرایه ۴ المانی q-HDRA [۱۵] ۱۱

شکل ۱-۱۵- آرایه دوالمانی آنتن تشدیدکننده دی‌الکتریک مثلثی [۱۷] ۱۱

شکل ۱-۱۶- نمودار تلفات برگشتی مربوط به آرایه مثلثی [۱۷] ۱۲

شکل ۱-۱۷- نمودار بهره و سمت‌گرایی آرایه مثلثی [۱۷] ۱۲
شکل ۱-۱۸- ساختار کلی آنتن تشدیدکننده SIW [۱۸] ۱۳
شکل ۲-۱- اشکال مختلف آنتن‌های DRA شامل استوانه‌ای، کروی، مستطیلی، سه گوشه‌ای و ۱۶
شکل ۲-۲- تغذیه مایکرواستریپ [۱] ۱۹
۲-۳- تغذیه کابل هم‌محور [۱] ۲۰
شکل ۲-۴- تغذیه تزویج روزنه‌ای [۱] ۲۰
شکل ۲-۵- آنتن تشدید کننده دی‌الکتریک استوانه‌ای ۲۱
شکل ۲-۶- امپدانس اندازه‌گیریشده بر حسب فرکانس برای DRA استوانه‌ای با $\varepsilon_r = 8.9$ و (الف) $a/d = 0.3$، (ب) $a/d = 0.5$، (ج) $a/d = 1.67$ و (د) $a/d = 0.15$ [۲] ۲۶
شکل ۳-۱ دسته‌بندی مواد بر اساس پارامترهای محیطی به همراه ضریب شکست [۲۳] ۳۱
شکل ۳-۲-(الف) سیم‌های نازک رسانا یا TW که دارای ε منفی و μ مثبت می‌باشد و(ب)ساختار رزوناتور حلقه‌ی شکافدار یا SRR که دارای ε مثبت و μ منفی می‌باشد [۲۳] ۳۳
شکل ۳-۳- اولین طرح‌های آزمایشگاهی ساختارهای متامتریال توسط اسمیت و همکارانش [۲۳] ۳۳
شکل ۳-۴- مدار معادل تک‌حلقه و دوحلقه تزویج‌شده [۲۳] ۳۶
شکل ۳-۵- وسایل و اتصالات آزمایشگاهی برای اثبات چپگرد بودن ساختار TW-SRR..... ۳۷
شکل ۳-۷- مدل خط انتقالی یک ساختار چپگرد ۳۹
شکل ۳-۸- پیاده سازی ساختار چپگرد توسط خازن سری و سلف موازی ۳۹
شکل۳-۹- مدل خط انتقالی یک ساختار CRLH و دیاگرام $\omega - \beta$ آن ۴۱
شکل ۳-۱۰- بردارهای($\vec{E}, \vec{H}, \vec{\beta}$)در یک محیط (الف) چپگرد و (ب) راستگرد [۲۳] ۴۳

شکل ۳-۱۱- شرایط مرزی در سطح مشترک بین دو محیط راستگرد (محیط۱) و چپگرد (محیط۲) ۴۸

شکل ۳-۱۲- تشعشع واویلف-سرنکف در مواد راستگرد (a) و مواد چپگرد (b) ۴۹

شکل ۳-۱۳- امواج تابیده شده، منعکس‌شده و منتقل شده بین دو محیط همگن ۵۱

شکل ۳-۱۴- شکست موج الکترومغناطیسی در فصل مشترک دو محیط (الف) راستگرد و (ب) چپگرد ۵۲

شکل ۳-۱۵- ناپیوسگی V شکل در فصل مشترک دو محیط با پارامترهای محیطی مختلف-العلامت [۲۶] ۵۳

شکل ۳-۱۶- موجبر پر شده از دو ماده ایزوتروپیک و همگن [۲۶] ۵۴

شکل ۳-۱۷- منحنی پاشندگی بر حسب ابعاد موجبر و لایه دی‌الکتریک (الف) هر دو لایه DPS (ب) یکی از لایه‌ها DPS و دیگری DNG ۵۶

شکل ۳-۱۸- آنتن دوقطبی در فضای آزاد پوشیده شده با لایه‌ای از ماده DNG ۵۸

شکل ۳-۱۹- نمودار بهره برحسب شعاع پوششی ماده متامتریال ۵۸

شکل ۳-۲۰- موج تابیده‌شده، منعکس‌شده و انتقال‌یافته در محیط DNG [۲۳] ۶۰

شکل ۳-۲۱- مدل نور هندسی در لنز مسطح با تیغه متامتریال [۲۳] ۶۰

شکل ۳-۲۲- نمونه‌ای از یک لنز مسطح ساخته شده در آزمایشگاه ۶۱

شکل ۳-۲۳- (الف) آرایه‌ی سیم‌های نازک رسانا، (ب) سلول واحد، (ج) نفوذپذیری الکتریکی موثر ، آرایه: خط ممتد قسمت حقیقی و خط‌چین‌ها قسمت موهومی می‌باشند [۲۶] ۶۲

شکل ۳-۲۴ محیط شبیه‌سازی شده برای آرایه سیمی و مدل خط انتقال آن(**Ls**و**Cs** به ترتیب سلف و خازن فضای آزاد و L مدل مداری سیم فلزی) ۶۳

شکل ۳-۲۵-(الف) آرایه SRR، (ب) سلول واحد: بالایی، حالت یک بعدی، پایینی حالت ۲ بعدی. (ج) نفوذپذیری مغناطیسی موثر آرایه: خطوط ممتد قسمت حقیقی، خط چین قسمت موهومی [۲۶] ۶۴

شکل ۳-۲۶- متامتریال DNG ساخته شده از سیمهای نازک فلزی و SRR (ب) سلول واحد یک بعدی(بالایی) و دو بعدی (پایینی) [۲۶] ۶۶

شکل ۳-۲۷- SRR و CSRR و مدل مداری آن‌ها[۶۴] ۶۷

شکل ۳-۲۸-(الف) یک SRR، (ب) یک MSRR [۶۴] ۶۸

شکل ۳-۲۹- مدار معادل ساختار SR [۶۴] ۶۸

شکل ۳-۳۰ اندازه‌گیری پارامترهای S (الف) تیغه‌ی یک‌بعدی همگن (ب) تیغه‌ی ناهمگن غیرمتقارن یک‌بعدی (ج) تیغه‌ی ناهمگن متقارن یک‌بعدی. d ضخامت یک سلول واحد از ساختار می‌باشد. محل‌های هاشورخورده با رنگ‌های متفاوت نشان‌دهنده‌ی مواد همگن متفاوت می‌باشند که دارای پارامترهای متمایز می‌باشند [۲۸] ۷۱

شکل ۴-۱- ساختار سلول متامتریال اول و ابعاد آن : $L = 9mm, w = 0.5mm, \mathrm{g} = 0.7\,\mathrm{mm}$ ۷۸

شکل ۴-۲- ساختار سلول واحد طراحی شده و شرایط مرزی اعمال شده ۷۹

شکل ۴-۳- نمودار اندازه و فاز ساختار سلول اول الف) نمودار اندازه پارامترهای پراکندگی ب) نمودار فاز پارامترهای پراکندگی ۸۱

شکل ۴-۴- پارامترهای محیطی ساختار سلول اول الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی $\boldsymbol{\varepsilon}$ بر حسب فرکانس ب) نمودار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی $\boldsymbol{\mu}$ بر حسب فرکانس پ) نمودار ضریب شکست $\boldsymbol{n}$بر حسب فرکانس ۸۲

شکل ۴-۵- ساختار سلول متامتریال دوم و ابعاد آن : $L = 15mm, w = 0.81mm, \mathrm{g} = 0.81mm, wstrip = 0.38mm$ ۸۳

شکل ۴-۶- ساختار سلول واحد طراحی شده و شرایط مرزی اعمال شده ۸۴

شکل ۴-۷- نمودار اندازه و فاز ساختار سلول سوم الف) نمودار اندازه پارامتر پراکندگی بر حسب فرکانس ب) نمودار فاز پارامتر پراکندگی بر حسب فرکانس ۸۵

شکل ۴-۸- پارامترهای محیطی ساختار سلول دوم الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی ε بر حسب فرکانس ب) نمودار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ بر حسب فرکانس پ) نمودار ضریب شکست nبر حسب فرکانس ۸۶

شکل ۴-۹- ساختار سلول متامتریال سوم و ابعاد آن : $L = 3.2mm, w = 0.175mm, \mathrm{g} = 0.15mm$ ۸۷

شکل ۴-۱۰- ساختار سلول واحد طراحی شده و شرایط مرزی اعمال شده ۸۸

شکل ۴-۱۱- نمودار اندازه و فاز ساختار سلول سوم الف) نمودار اندازه پارامتر پراکندگی بر حسب فرکانس ب) نمودار فاز پارامتر پراکندگی بر حسب فرکانس ۸۹

شکل ۴-۱۲- پارامترهای محیطی ساختار سلول دوم الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی ε بر حسب فرکانس ب) نمودار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ بر حسب فرکانس پ) نمودار ضریب شکست nبر حسب فرکانس ۹۰

شکل ۴-۱۳- ساختار سلول متامتریال چهارم و ابعاد آن : ۹۱

شکل ۴-۱۴- ساختار سلول واحد طراحی شده و شزایط مرزی اعمال شده ۹۲

شکل ۴-۱۵- نمودار اندازه و فاز ساختار سلول چهارم الف) نمودار اندازه پارامتر پراکندگی بر حسب فرکانس ب) نمودار فاز پارامتر پراکندگی بر حسب فرکانس ۹۳

شکل ۴-۱۶- پارامترهای محیطی ساختار سلول چهارم الف) نمودار ضریب گذردهی الکتریکی ε بر حسب فرکانس ب) نمودار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ بر حسب فرکانس پ) نمودار ضریب شکست nبر حسب فرکانس ۹۴

شکل ۵-۱- آنتن DRA کروی با رولایهای از ساختار متامتریال اول ۹۸

شکل ۵-۲- تلفات برگشتی مربوط به آنتن DRA کروی در دو حالت بدون رولایه متامتریال و با استفاده از رولایه متامتریال ۹۸

شکل ۵-۳- نمودار بهره آنتن DRA کروی بدون حضور متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ۹۹

شکل ۵-۴- نمودار بهره آنتن DRA کروی با رولایه متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ۹۹

شکل ۵-۵- الگوی تشعشعی آنتن DRA کروی بدون رولایه متامتریال ۱۰۰
شکل ۵-۶- الگوی تشعشعی آنتن DRA کروی با رولایه متامتریال ۱۰۰
شکل ۵-۷- آنتن DRA استوانه ای با رولایه ای از ساختار متامتریال اول ۱۰۲
شکل ۵-۸- تلفات برگشتی مربوط به آنتن DRA استوانه‌ای در دو حالت بدون رولایه متامتریال و با استفاده از رولایه متامتریال ۱۰۲
شکل ۵-۹- نمودار بهره آنتن DRA استوانه‌ای بدون حضور متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ۱۰۳
شکل ۵-۱۰- نمودار بهره آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ۱۰۳
شکل ۵-۱۱- الگوی تشعشعی آنتن DRA استوانه‌ای بدون رولایه متامتریال ۱۰۴
شکل ۵-۱۲- الگوی تشعشعی آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه متامتریال ۱۰۴
شکل ۵-۱۳- آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه‌ای از ساختار متامتریال سوم ۱۰۵
شکل ۵-۱۴- تلفات برگشتی مربوط به آنتن DRA استوانه‌ای در دو حالت بدون رولایه متامتریال و با استفاده از رولایه متامتریال ۱۰۶
شکل ۵-۱۵- نمودار بهره آنتن DRA استوانه‌ای بدون حضور متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ..۱۰۶
شکل ۵-۱۶- نمودار بهره آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ۱۰۷
شکل ۵-۱۷- الگوی تشعشعی آنتن DRA استوانه‌ای بدون رولایه متامتریال ۱۰۷
شکل ۵-۱۸- الگوی تشعشعی آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه متامتریال ۱۰۸
شکل ۵-۱۹- آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه‌ای از ساختار متامتریال چهارم ۱۰۸
شکل ۵-۲۰- تلفات برگشتی مربوط به آنتن DRA استوانه‌ای در دو حالت بدون رولایه متامتریال و با استفاده از رولایه متامتریال ۱۰۹
شکل ۵-۲۱- نمودار بهره آنتن DRA استوانه‌ای بدون حضور متامتریال در صفحه $\phi = 0$. ۱۰۹
شکل ۵-۲۲- نمودار بهره آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه متامتریال در صفحه $\phi = 0$ ۱۱۰
شکل ۵-۲۳- الگوی تشعشعی آنتن DRA استوانه‌ای بدون رولایه متامتریال ۱۱۰

شکل ۵-۲۴- الگوی تشعشعی آنتن DRA استوانه‌ای با رولایه متامتریال ۱۱۱

فصل اول