

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مخابرات

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق مخابرات - گرایش میدان ها و امواج

عنوان

**طراحی و ساخت آنتن بسیار پهن باند چندکاربردی GPR**

استاد راهنما:

**دکتر سعید نیک مهر**

استاد مشاور:

**دکتر علی پورزیاد**

پژوهشگر:

**مریم صمدپور هندواری**

شهریور ۱۳۹۳

در آغاز خدای متعال را حمد و سپاس می‌گویم که مرا یاری داد تا در راهی گام بردارم که مقصدش درک عظمت خداوند و ناچیزی دانش اندک من در برابر دریای بی‌کران علم اوست. از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر نیک‌مهر نهایت سپاس را دارم که راهنمایی مرا در این پایان‌نامه عهده‌دار بودند. استادی که در لحظات سرد و تاریک نادانی، شمعی فروزان شده و ضیافتی سرشار از نور و گرما به پا کردند و سپیده‌دمان شاداب موفقیت، وام‌دار زحمات ایشان است. از استاد ارزشمندم جناب آقای دکتر پورزیاد کمال تشکر را دارم که در این پایان‌نامه استاد مشاور من بودند. استادی که در بذل دانش بسیار سخاوتمند بوده و در پرورش امید و نشاط و اطفای حریق ناامیدی نمونه‌اند.

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر بمانی کمال قدردانی را دارم که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده دارند. استادی که شوق علم‌آموزی را با مهارت پرورش می‌دهند و در لحظات سخت اضطراب، گیاه در حال پژمردن امید و شادی را در وجود من زنده کردند. و از پدر و مادر عزیزم تشکر می‌کنم. بار الهی، به راستی که چه روزگار درازی را در پروریدن من گذرانده‌اند و چه رنج‌ها و محنت‌هایی که در مراقبت از من به جان خریده‌اند و تا چه پایه به خاطر آسایش من دشواری‌ها را بر خویشان روا داشته‌اند.

از خواهران عزیزم تشکر می‌کنم که همیشه به مهرشان دلگرمم. از خدای مهربان برای تمامی این عزیزان، طول عمر همراه با سلامت و سربلندی خواستارم. خدایا، بانگ مرا در گوششان آرام و ملایم ساز و سخنم را برایشان دلنشین گردان و خلق و خوی مرا در برخورد با ایشان خوش گردان و در برابرشان سر به راهم کن و دلم را از مهرشان لبریز گردان و مرا با آنان رفیق و برایشان شفیق و مهربان ساز.

مریم صمدپور

تقدیم به شکوه زندگی

پدر و مادر عزیزم

به زلال صفا

خواهران مهربانم

طراوت مهر

خواهرزاده نازنینم، یوسف عزیز

و به روح بلند پرواز شهید عباس بابایی

زندگی چیست؟ گلی بوییدن، سبزه‌ای بر لب جو روییدن  
گذر عمر به رسم انسان، لحظه‌ای آه، دمی خندیدن  
زندگی چیست؟ رهایی تا اوج، یا شدن ماه اسیری در موج  
قدردان همه‌ی عمر شدن، می‌رود چون لحظاتم چون فوج  
دور می‌گشتن از این شهر غریب، سوی دلدار، همان یار قریب  
رحل، این بادیه را پیمودن، تا فریبت ندهد گندم و سیب

آسمان ابری و تار است و کبود

بر فرش زمین هیچ، نه تار است و نه پود

هر لحظه ز عمر می‌رود، لیک چه سود

فرقش چیست دلم از بود و نبود؟

ای کاش کمی ز راه ما کم می‌شد

این خشک زمین، سبز و کمی نم می‌شد

بر سنگ و گل و برگ که شب‌نم می‌شد

لبخند، ختام این همه غم می‌شد...

اللهم عجل لولیک الفرج...

نام خانوادگی: صمدپور هندواری	نام: مریم
عنوان پایان‌نامه: طراحی و ساخت آنتن بسیار پهن باند چند کاربردی GPR	
استاد راهنما: دکتر سعید نیک مهر	استاد مشاور: دکتر علی پورزیاد
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق مخابرات گرایش: میدان‌ها و امواج دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۹۳ تعداد صفحات: ۱۰۵	
کلید واژه‌ها: رادار نفوذ به زمین (GPR)، آنتن‌های UWB، آنتن‌های تشعشع کننده پالس.	
<p><b>چکیده:</b> به دلیل کاربردهای بسیار سیستم‌های GPR برای تشخیص انواع مختلف اهداف در زیر سطح زمین، طراحی آنتن مناسب برای این سیستم‌ها در این پایان‌نامه مورد نظر خواهد بود. آنتن‌های مورد استفاده در سیستم‌های GPR باید دارای ویژگی‌هایی از قبیل UWB بودن، قابلیت انتقال سیگنال با کمترین اعوجاج، پلاریزاسیون مناسب، سطح گلبزرگ فرعی پایین، کوچکی و ارزان قیمت بودن باشند.</p> <p>در این پایان‌نامه دو آنتن جدید برای کاربرد GPR طراحی شده است. آنتن اول، یک آنتن فرکانس حلقوی با چهار تکرار با زمین شکاف‌دار بوده که دارای سه باند فرکانسی پهن‌بند با پهنای باند کسری به ترتیب 23.42%، 35.96% و 17.29% با شرط <math> S_{11}  &lt; -10\text{dB}</math> به دست آمده است. با بارگذاری این آنتن توسط دو وایا در اولین محل بی‌نظمی توزیع جریان، تطبیق امپدانس این آنتن در فرکانس‌های میانی این باندها نیز بهبود یافته و پهنای باند کسری 118.91% با شرط <math> S_{11}  &lt; -5\text{dB}</math> به دست می‌آید. بنابراین، آنتن دارای ویژگی UWB خواهد بود. نتیجه شبیه‌سازی این آنتن در حوزه زمان نیز نشان می‌دهد که این آنتن قادر به انتقال پالس با اعوجاج اندک خواهد بود. در نتیجه این آنتن به عنوان یک آنتن تشعشع کننده پالس، همچون آنتن GPR می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.</p> <p>نتایج شبیه‌سازی این آنتن با در نظر گرفتن زیرلایه Rogers به ابعاد <math>72 \times 72 \times 3.2\text{ mm}^3</math> به دست آمده است. به دلیل در دسترس نبودن این زیرلایه، در عمل از زیرلایه FR4 که ارزان قیمت و در دسترس است استفاده شده است. نمونه‌ای از این آنتن ساخته و اندازه‌گیری شده است. نتیجه اندازه‌گیری با شبیه‌سازی مقایسه شده و انطباق خوبی مشاهده شده است.</p> <p>آنتن دوم، یک آنتن متناوب لگاریتمی با تغذیه متقاطع (با بارگذاری با وایا) بوده که در بازه فرکانسی 1.63 GHz تا 7 GHz دارای مشخصه <math> S_{11}  &lt; -5\text{dB}</math> و از 4.4 GHz تا 6.56 GHz با مشخصه <math> S_{11}  &lt; -10\text{dB}</math> به دست آمده است. این آنتن نیز در حوزه زمان شبیه‌سازی شده و مشاهده شده که قابلیت انتقال پالس با اعوجاج اندک را داراست. این آنتن نیز با در نظر گرفتن زیر لایه Teflon</p>	

شبیه‌سازی شده، ولی برای ساخت از زیرلایه FR4 استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی این آنتن با زیرلایه FR4 بر خلاف انتظار، به خوبی بهبود یافته و از 4.3 GHz تا 10 GHz مشخصه  $|S_{11}| < -10$  dB به دست آمده و از 1.9 GHz تا 10 GHz هم  $|S_{11}| < -5$  dB حاصل شده است. نمونه‌ای از این آنتن نیز ساخته و اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتیجه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی این آنتن نیز تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

## فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
فصل دوم.....	۵
۱-۲ مروری بر پژوهش‌های پیشین.....	۶
فصل سوم.....	۲۳
۱-۳ مواد و روش‌ها.....	۲۴
۱-۳-۱ روش FEM.....	۲۴
۱-۳-۲ آنتن‌های موج رونده.....	۲۸
۱-۳-۳ ویژگی‌های کلی آنتن‌های موج رونده.....	۳۱
۱-۳-۴ تشعشع آنتن موج رونده کند.....	۳۵
۱-۳-۵ تشعشع آنتن موج رونده تند.....	۴۳
۱-۳-۶ آنتن موج رونده سیمی خطی بار گذاری شده.....	۴۶
۱-۳-۷ یادآوری: لایه دی‌الکتریک و هادی شیاردار می‌توانند موج سطحی کند را پشتیبانی کنند.....	۵۴
فصل چهارم.....	۵۷
بخش اول.....	۵۸
۱-۴ آنتن GPR فرکتال حلقوی.....	۵۸
۱-۴-۱ مقدمه.....	۵۸
۱-۴-۲ تعیین ابعاد پچ حلقوی دایروی پایه.....	۶۴
۱-۴-۳ بررسی حلقه‌های تو در تو.....	۶۸
۱-۴-۴ بررسی شکاف‌های صفحه زمین.....	۷۵
۱-۴-۵ اثر دندان‌گذاری لبه‌های پچ و شکاف‌های زمین و استفاده از وایا.....	۷۸
۱-۴-۶ بررسی قابلیت انتقال سیگنال آنتن فرکتال پیشنهادی در حوزه زمان.....	۸۲
۱-۴-۷ ساخت و اندازه‌گیری.....	۸۳
بخش دوم.....	۸۵
۲-۴ آنتن GPR متناوب لگاریتمی.....	۸۵
۱-۲-۴ مقدمه.....	۸۵
۲-۲-۴ گزارش آنتن متناوب لگاریتمی مناسب برای GPR.....	۸۷



۹۷	.....	۳-۲-۴ ساخت و اندازه‌گیری
۹۹	.....	فصل پنجم
۱۰۰	.....	۱-۵ نتایج و بحث
۱۰۲	.....	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام سیستم GPR..... ۳
- شکل (۱-۲) هندسه آنتن دوقطبی تغییر یافته میکرواستریپی [۶]..... ۶
- شکل (۲-۲) (الف) هندسه آنتن پروانه‌ای سیمی تطبیق یافته، (ب) مدل ناحیه تغذیه..... ۸
- شکل (۲-۳) (الف) هندسه آنتن GPR بارگذاری شده با بار مقاومتی و دارای حفره با پوشش فریتی. (ب) سیستم بای‌استاتیک GPR [۱۱]..... ۹
- شکل (۲-۴) (الف) آنتن پروانه‌ای. (ب) آنتن با حفره [۱۲]..... ۱۰
- شکل (۲-۵) (الف) آنتن‌ها بر فراز سطح زمین با دید از کنار. (ب) آنتن‌ها با دید از بالا [۱۲]..... ۱۰
- شکل (۲-۶) آنتن پروانه‌ای با انتهای دایروی با بارگذاری خازنی خطی بر روی زیرلایه epoxy با طول 50cm و زاویه بازشدگی  $90^\circ$  [۱۳]..... ۱۱
- شکل (۲-۷) هندسه مقیاس شده آنتن‌های مختلف به منظور مقایسه، شکل‌ها به ترتیب از بالا به پایین: آنتن پروانه‌ای تغییر یافته، آنتن پروانه‌ای معمولی، دوقطبی صفحه‌ای و دوقطبی سیمی [۱۴]..... ۱۲
- شکل (۲-۸) هندسه مسأله GPR با آنتن حلزونی [۱۸]..... ۱۳
- شکل (۲-۹) (الف) آنتن شیپوری تغییر یافته. (ب) آنتن شیپوری بهینه [۲۱]..... ۱۵
- شکل (۲-۱۰) آنتن TSA استاندارد و مدل سطح دنداندار [۲۴]..... ۱۶
- شکل (۲-۱۱) نمونه‌ای از آنتن‌های پچ چند حلقه‌ای [۳۲]..... ۱۷
- شکل (۲-۱۲) آنتن پیشنهاد شده در مقاله [۳۳]..... ۱۸
- شکل (۲-۱۳) آرایه پچ میکرواستریپی متناوب لگاریتمی (الف) دید برشی. (ب) جزئیات پچ. (ج) ترکیب شکل با استفاده از زیرلایه و خط انتقال تیپر شده [۳۴]..... ۱۹
- شکل (۲-۱۴) آنتن میکرواستریپی با تغذیه توسط کابل کوکسیال [۳۹]..... ۲۰
- شکل (۲-۱۵) دید کلی QLPMA [۳۹]..... ۲۱
- شکل (۲-۱۶) هندسه آنتن پچ دو تغذیه‌ای [۴۰]..... ۲۱
- شکل (۲-۱۷) هندسه آرایه متناوب لگاریتمی پچ‌های دو تغذیه‌ای. (الف) دید از بالا. (ب) دید از کنار. (ج) دید از پایین [۴۰]..... ۲۲
- شکل (۳-۱) عناصر محدود نوعی: (الف) یک‌بعدی، (ب) دو‌بعدی، (ج) سه‌بعدی..... ۲۴
- شکل (۳-۲) عنصر مثلثی نوعی..... ۲۵
- شکل (۳-۳) توابع شکلی  $\alpha_1, \alpha_2$  و  $\alpha_3$  برای یک عنصر مثلثی..... ۲۶
- شکل (۳-۴) مثلث پاسکال و تابع پایه چندجمله‌ای مربوطه برای درجات ۰ تا ۴..... ۲۷
- شکل (۳-۵) هرم (چهار وجهی پاسکال) و آرایه عبارات مربوطه..... ۲۷
- شکل (۳-۶) آنتن موج رونده Beverage [۱]..... ۲۹
- شکل (۳-۷) موجبر مستطیلی شکاف‌دار، روزنه‌ای به عنوان آنتن موج نشستی یکنواخت [۱]..... ۳۰

- شکل (۳-۸) مثالی از آنتن موج نشتی متناوب [۱]..... ۳۰
- شکل (۳-۹) جهت‌داری یک توزیع موج رونده یکنواخت متقارن محوری..... ۳۳
- شکل (۳-۱۰) منحنی میدان ثابت بالای سطح ساختار موج سطحی بر حسب P [۳]..... ۳۵
- شکل (۳-۱۱) هندسه میله جریان..... ۳۶
- شکل (۳-۱۲) (الف) جریان پالس گوسی (ب) مشتق جریان پالس گوسی..... ۳۷
- شکل (۳-۱۳) انرژی کل تشعشع شده توسط میله تحریک شده توسط پالس گوسی با زمان مشخصه  $\tau$  و  $\tau_a = L/c$ ..... ۳۸
- شکل (۳-۱۴) میدان الکتریکی تشعشع شده توسط میله با توزیع جریان موج رونده با تحریک پالس گوسی با  $\tau/\tau_a = 0.076$ ..... ۳۹
- شکل (۳-۱۵) میدان الکتریکی تشعشع شده توسط میله با توزیع جریان یکنواخت با تحریک پالس گوسی با  $\tau/\tau_a = 0.076$ ..... ۳۹
- شکل (۳-۱۶) میله جریان که به n المان تقسیم شده..... ۴۱
- شکل (۳-۱۷) (الف) مشتق پالس مثلثی جریان (ب) پالس مثلثی جریان..... ۴۲
- شکل (۳-۱۸) (الف) مجموع (ضریب آرایه) عبارت میدان الکتریکی تشعشع شده برای جریان با توزیع موج رونده (ب) مجموع (ضریب آرایه) عبارت میدان الکتریکی تشعشع شده برای جریان با توزیع یکنواخت. (تحریک توسط پالس مثلثی با  $\tau/\tau_a = 0.125$ )..... ۴۲
- شکل (۳-۱۹) تصویری برای نشان دادن حذف بخشی از تشعشع از دو المان جریان مربوط به موج رونده در  $\theta = 90^\circ$  و  $n = 32$ ..... ۴۳
- شکل (۳-۲۰) موجبر با شکاف طولی..... ۴۴
- شکل (۳-۲۱) تغییرات  $\alpha_z L$  بر حسب بازدهی آنتن..... ۴۶
- شکل (۳-۲۲) پترن توان اندازه‌گیری شده برای دوقطبی موج رونده در ۶۰۰ مگا هرتز..... ۴۹
- شکل (۳-۲۳) پترن توان اندازه‌گیری شده برای دوقطبی موج ساکن در ۶۰۰ مگا هرتز..... ۴۹
- شکل (۳-۲۴) پترن توان اندازه‌گیری شده دوقطبی موج رونده ( $L = 32.6\text{cm}$ )..... ۴۹
- شکل (۳-۲۵) پترن توان اندازه‌گیری شده دوقطبی موج ساکن ( $L = 32.6\text{cm}$ )..... ۵۰
- شکل (۳-۲۶) آنتن مونوپل بارگذاری شده با دوقطبی تا شده تغییر یافته..... ۵۱
- شکل (۳-۲۷) آنتن بارگذاری شده با دو دوقطبی تا شده تغییر یافته..... ۵۲
- شکل (۳-۲۸) آنتن مونوپل بارگذاری شده با آنتن حلقوی..... ۵۳
- شکل (۳-۲۹) لایه دی‌الکتریک..... ۵۴
- شکل (۳-۳۰) صفحه هادی شیاردار..... ۵۵
- شکل (۴-۱) پچ حلقوی دایروی با شعاع خارجی 12 mm و شعاع داخلی 6 mm با زیرلایه FR4..... ۶۰
- شکل (۴-۲) پارامتر  $|S_{11}|$  پچ حلقوی دایروی با شعاع خارجی 12 mm و شعاع داخلی 6 mm..... ۶۰

شکل (۳-۴) توزیع جریان پیچ حلقوی دایروی نشان داده شده در شکل (۴-۱): (الف) در فرکانس رزونانس اول 2.96 GHz، (ب) در فرکانس رزونانس دوم 5.54 GHz، (ج) در فرکانس رزونانس سوم 7.91 GHz. ۶۱

شکل (۴-۴) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی مربعی با حلقه خارجی به ضلع 24 mm و حلقه داخلی به ضلع 12mm. ۶۲

شکل (۴-۵) توزیع جریان پیچ حلقوی مربعی با حلقه خارجی به ضلع 24 mm و حلقه داخلی به ضلع 12mm (الف) در فرکانس رزونانس اول 2.42 GHz (ب) در فرکانس رزونانس دوم 5.27 GHz (ج) در فرکانس رزونانس سوم 6.62 GHz. ۶۳

شکل (۴-۶) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با شعاع خارجی 16 mm بر روی زیرلایه Rogers. خط توپر مربوط به حلقه با شعاع داخلی 8 mm و خط نقطه چین مربوط به حلقه با شعاع داخلی 11 mm است. ۶۵

شکل (۴-۷) توزیع جریان پیچ حلقوی دایروی با شعاع خارجی 16 mm و شعاع داخلی 8 mm بر روی زیرلایه Rogers در فرکانس رزونانس اول آن. ۶۵

شکل (۴-۸) پترن تشعشعی آنتن پیچ حلقوی دایروی در رزونانس‌های اول، دوم و سوم آن. ۶۶

شکل (۴-۹) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با شعاع خارجی 16 mm بر روی زیرلایه Rogers. خط توپر مربوط به حلقه با شعاع داخلی 14 mm و خط نقطه چین مربوط به حلقه با شعاع داخلی 15 mm است. ۶۷

شکل (۴-۱۰) توزیع جریان پیچ حلقوی دایروی با شعاع خارجی 16 mm و شعاع داخلی 14 mm در فرکانس رزونانس اول آن. ۶۷

شکل (۴-۱۱) دو حلقه تودرتو (هم‌مرکز) با شعاع‌های به ترتیب 16 mm، 14 mm، 12 mm و 10 mm. ۶۸

شکل (۴-۱۲) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو هم‌مرکز. ۶۹

شکل (۴-۱۳) پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو غیر هم‌مرکز (مجاورت حلقه‌ها در لبه انتهایی). ۶۹

شکل (۴-۱۴) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو غیر هم‌مرکز (مجاورت حلقه‌ها در لبه انتهایی). ۶۹

شکل (۴-۱۵) پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو غیر هم‌مرکز و مجاور هم در نزدیکی محل تغذیه. ۷۰

شکل (۴-۱۶) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو غیر هم‌مرکز و مجاور هم در نزدیکی محل تغذیه. ۷۰

شکل (۴-۱۷) پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو هم‌مرکز و متصل به هم در لبه انتهایی. ۷۱

شکل (۴-۱۸) پارامتر  $|S_{11}|$  مربوط به پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو هم‌مرکز و متصل به هم در لبه انتهایی. ۷۱

شکل (۴-۱۹) پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو هم‌مرکز متصل به هم در لبه انتهایی به همراه حلقه مرکزی سوم. ۷۱

شکل (۴-۲۰) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با دو حلقه تو در تو هم‌مرکز متصل به هم در لبه انتهایی به همراه حلقه مرکزی سوم. ۷۲

شکل (۴-۲۱) پیچ حلقوی دایروی با سه حلقه تو در تو ی هم مرکز با وجود اتصال به حلقه پیشین در انتهای هر حلقه داخلی..... ۷۲

شکل (۴-۲۲) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ حلقوی دایروی با سه حلقه تو در تو ی هم مرکز با وجود اتصال به حلقه پیشین در انتهای هر حلقه داخلی..... ۷۳

شکل (۴-۲۳) پیچ فرکتال حلقوی دایروی با چهار حلقه هم مرکز متصل به هم با عرض 2 mm..... ۷۳

شکل (۴-۲۴) نمودار ضریب انعکاس پیچ حلقوی فرکتالی شکل (۴-۲۵) به همراه قرار دادن کابل کواکسیال در محل مناسب برای ایجاد تطبیق امپدانس تا حد امکان و مقایسه نتایج برای حالت‌های بدون تکرار و با دو، سه و چهار تکرار..... ۷۴

شکل (۴-۲۵) پیچ فرکتال حلقوی دایروی پیشنهادی با چهار تکرار..... ۷۵

شکل (۴-۲۶) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ فرکتال حلقوی دایروی پیشنهادی..... ۷۵

شکل (۴-۲۷) زمین با وجود سه شکاف..... ۷۶

شکل (۴-۲۸) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ فرکتال حلقوی دایروی پیشنهادی با زمین شکاف دار (هر بار تنها با یک شکاف)..... ۷۶

شکل (۴-۲۹) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ فرکتال حلقوی دایروی پیشنهادی با زمین شکاف دار (هر بار تنها با دو شکاف)..... ۷۷

شکل (۴-۳۰) پارامتر  $|S_{11}|$  پیچ فرکتال حلقوی دایروی پیشنهادی با زمین شکاف دار (با وجود هر سه شکاف)..... ۷۸

شکل (۴-۳۱) پترن تشعشی آنتن پیچ فرکتال حلقوی دایروی پیشنهادی با چهار تکرار و با وجود هر سه شکاف در صفحه زمین در سه باند فرکانسی در فرکانس‌های 1.625 GHz، 3.15 GHz و 5.16 GHz..... ۷۸

شکل (۴-۳۲) توزیع جریان آنتن فرکتال حلقوی پیشنهادی با چهار تکرار و با وجود سه شکاف در صفحه زمین در دو فرکانس 1.793 GHz و 2.21 GHz..... ۷۹

شکل (۴-۳۳) محل قرارگیری وایاها و نحوه دندان‌گذاری پیچ پیشنهادی..... ۸۰

شکل (۴-۳۴) پارامتر  $|S_{11}|$  آنتن فرکتال پیشنهادی با وجود دو وایا در دو حالت پیچ ساده و پیچ دندان‌دار..... ۸۱

شکل (۴-۳۵) پترن تشعشی آنتن فرکتال حلقوی پیشنهادی با وجود چهار تکرار و سه شکاف در صفحه زمین با وجود دو عدد وایا و پیچ با لبه دندان‌دار در چهار فرکانس نمونه 1.32 GHz، 1.9 GHz و 2.8 GHz و 4.7 GHz..... ۸۱

شکل (۴-۳۶) پالس گوسی و سیگنال‌های منعکس شده نرمالیزه در دهانه ورودی آنتن پیشنهادی..... ۸۲

شکل (۴-۳۷) نمونه ساخته شده آنتن فرکتال حلقوی با تغذیه تغییر یافته، (الف) دید از بالا، (ب) دید از پایین..... ۸۳

شکل (۴-۳۸) مقایسه نتیجه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن فرکتال حلقوی پیشنهادی با وجود دو وایا با در نظر گرفتن زیرلایه FR4..... ۸۴

شکل (۴-۳۹) ترکیب شکل LPMA ارائه شده در [۴۱]..... ۸۶

- شکل (۴-۴۰) ضریب انعکاس شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهاد شده در مقاله [۴۱]..... ۸۷
- شکل (۴-۴۱) آنتن متناوب لگاریتمی با تغذیه متقاطع با استفاده از وایا..... ۸۹
- شکل (۴-۴۲) نمودار  $|S_{11}|$  آنتن متناوب لگاریتمی با تغذیه متقاطع با استفاده از وایا..... ۸۹
- شکل (۴-۴۳) ایجاد شکاف مستطیلی به طول 60 mm و عرض 5 mm در صفحه زمین..... ۹۰
- شکل (۴-۴۴) دندان‌گذاری پچ‌ها با حفظ شکاف مستطیلی در صفحه زمین..... ۹۰
- شکل (۴-۴۵) نمودار ضریب انعکاس آنتن در حالت‌های بدون دندان، با دندان و با وایاهای کمتر با وجود یک شکاف مستطیلی در روی زمین..... ۹۱
- شکل (۴-۴۶) آنتن با پچ‌های متصل به وایا و هموار شده با حفظ دندان‌های به عمق یک هشتم طول پچ و با حضور شکاف مستطیلی در صفحه زمین..... ۹۱
- شکل (۴-۴۷) نمودار ضریب انعکاس آنتن با پچ‌های متصل به وایا و هموار شده..... ۹۲
- شکل (۴-۴۸) ایجاد شکاف هلالی به جای شکاف مستطیلی در صفحه زمین..... ۹۲
- شکل (۴-۴۹) آنتن با دندان‌های عمیق‌تر..... ۹۳
- شکل (۴-۵۰) نمودار ضریب انعکاس آنتن با ایجاد شکاف هلالی در صفحه زمین با دندان‌گذاری‌های کوچک (یک هشتم طول پچ) و بزرگ (یک چهارم طول پچ)..... ۹۳
- شکل (۴-۵۱) آنتن با دندان‌گذاری عمیق و مستطیلی..... ۹۴
- شکل (۴-۵۲) نمودار ضریب انعکاس آنتن با دندان‌گذاری عمیق و مستطیلی..... ۹۴
- شکل (۴-۵۳) ساختار نهایی آنتن پیشنهادی (الف) دید از بالا (ب) دید از پایین..... ۹۶
- شکل (۴-۵۴) نمودار  $|S_{11}|$  آنتن پیشنهادی در دو حالت طول تغذیه انتخاب شده، نمودار توپر برای  $f=1.86\text{mm}$  و نمودار خط چین برای  $f=9.86\text{mm}$ ..... ۹۶
- شکل (۴-۵۵) مقایسه سیگنال انعکاس یافته در ورودی آنتن لگاریتمی [۴۱] (نمودار خط چین) و آنتن پیشنهادی نهایی در این پایان‌نامه (نمودار خط توپر)..... ۹۶
- شکل (۴-۵۶) نمونه ساخته شده آنتن متناوب لگاریتمی پیشنهادی، (الف) دید از بالا، (ب) دید از پایین..... ۹۷
- شکل (۴-۵۷) مقایسه نتیجه اندازه‌گیری با شبیه‌سازی آنتن متناوب لگاریتمی پیشنهادی..... ۹۸

## فصل اول

واژه رادار در سال ۱۹۴۱ توسط ارتش نیروی دریایی ایالات متحده به عنوان سرنام کشف و مسافت یابی رادیویی (RADAR) ابداع شد. رادار کاربردهای بسیاری از جمله کنترل ترافیک هوایی، سیستم‌های پدافند هوایی، سیستم‌های کنترل پرواز و ارتفاع، سیستم‌های ضد موشک، رادارهای دریایی برای موقعیت یابی کشتی و رادار نفوذ به زمین GPR<sup>۱</sup> دارد.

عبارت GPR به تکنیک‌های الکترومغناطیسی برای موقعیت یابی اشیاء و سطوح در زیر سطح زمین اطلاق می‌شود. GPR کاربردهای بسیار گسترده‌ای از جمله ارزیابی استحکام بتن، تعیین ضخامت پوشش جاده، کاوش‌های باستان‌شناسی، مین‌یابی، تشخیص ترکیب لوله‌ها و کاربردهای پزشکی در تشخیص برخی سرطان‌ها دارد.

یک سیستم GPR اجزای مختلفی از قبیل فرستنده، گیرنده، سیستم پردازش سیگنال و در مواردی سیستم پردازش تصویر دارد. خود فرستنده و گیرنده، همانند سیستم‌های مخابراتی دیگر، از اجزای مختلفی شامل آنتن، فیلتر، تقویت‌کننده و غیره تشکیل می‌شود. آنتن باید میدان الکترومغناطیسی را از هوا به زمین که باتلف و دیسپرسیو<sup>۲</sup> (وابسته به فرکانس) است تزویج کند؛ بنابراین مهم‌ترین مؤلفه این سیستم آنتن آن است. با وجود کارها و پژوهش‌های فراوانی که بر روی سیستم‌های GPR تا کنون انجام گرفته، به دلیل تنوع اهداف، هنوز آنتن ایده‌آلی که تمامی ویژگی‌های مطلوب برای آنتن GPR را دارا باشد معرفی نشده است. در این پایان‌نامه سعی بر معرفی دو آنتن جدید برای کاربرد GPR خواهد بود.

آنتن مناسب برای GPR باید دارای ویژگی‌هایی شامل پهنای باند وسیع، قابلیت انتقال سیگنال با کمترین میزان اعوجاج، پلاریزاسیون مناسب، جهت‌داری بالا، سطح گلبزرگ فرعی پایین، عرض باند باریک، سبکی و ارزان قیمت بودن باشد. برای کاهش اعوجاج سیگنال دریافتی و تشخیص اهداف کوچک‌تر، از پالس با عرض زمانی کوتاه به عنوان پالس تحریک در آنتن فرستنده استفاده می‌شود. کم بودن عرض پالس در حوزه زمان به معنای گسترده بودن پهنای باند آن در حوزه فرکانس است. به همین دلیل آنتن‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها باید بسیار پهن‌بند (UWB)<sup>۳</sup> باشند. این مشخصه مهم‌ترین ویژگی آنتن در این سیستم‌ها است.

اگر یک آنتن واحد به عنوان آنتن فرستنده و گیرنده به کار رود سیستم مونواستاتیک<sup>۴</sup> و اگر از دو آنتن مجزا برای این منظور استفاده شود بای‌استاتیک<sup>۵</sup> نامیده می‌شود. به دلیل عدم وجود سوئیچ‌های

<sup>۱</sup> Radio Detection And Ranging

<sup>۲</sup> Ground Penetrating Radar

<sup>۳</sup> Dispersive

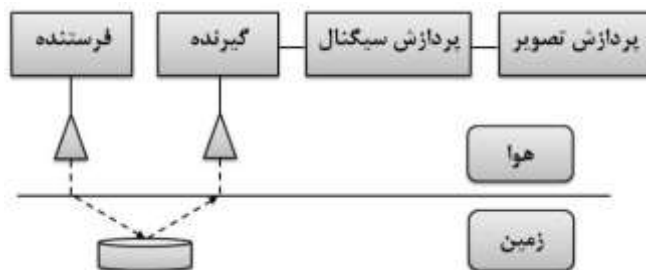
<sup>۴</sup> Ultra Wide Band

<sup>۵</sup> Mono-static

<sup>۶</sup> Bi-static



به اندازه کافی سریع، در حالت مونواستاتیک امکان سویچ شدن فرستنده به گیرنده مشکل خواهد بود. به همین دلیل معمولاً سیستم به صورت بای‌استاتیک استفاده می‌شود. شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام یک سیستم GPR را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام سیستم GPR

آنتن فرستنده میدان الکترومغناطیسی را به سمت زمین می‌تاباند. بخشی از میدان تابشی به داخل زمین منتقل می‌شود و بخشی هم از سطح مشترک هوا-زمین منعکس می‌گردد. دامنه میدان‌های منعکس و منتقل شونده به مشخصات الکترومغناطیسی هوا و زمین، زاویه تابش میدان به سطح مشترک و پلاریزاسیون میدان تابشی بستگی دارد. به همین ترتیب، پس از اینکه میدان منتقل شده به هدف رسید بخشی از آن منعکس می‌شود. آنتن گیرنده، میدان انتقالی این میدان منعکس شده را در هوا دریافت می‌کند. در خلال روند انتقال میدان الکترومغناطیسی از آنتن فرستنده به گیرنده، ممکن است این میدان دچار تغییر پلاریزاسیون شود. دو عامل در بروز این پدیده اثر می‌گذارند: اول، تغییر پلاریزاسیون به دلیل تغییر جهت انتشار؛ دوم، تغییر پلاریزاسیون ناشی از اثر هندسه جسم هدف بر پراکندگی میدان الکترومغناطیسی.

بنابراین پلاریزاسیون سیگنال دریافتی در آنتن گیرنده تابعی از پلاریزاسیون آنتن فرستنده و مشخصات پراکندگی هدف است. همین مشخصات پراکندگی وابسته به پلاریزاسیون برای آشکارسازی بهینه و تمیز دادن بهتر اهداف گوناگون از نظر اندازه، شکل، جهت‌گیری و مشخصات الکترومغناطیسی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین برای حذف انعکاس مستقیم سیگنال از زمین می‌توان از عدم تطبیق پلاریزاسیون استفاده کرد.

هنگام جستجوی جسم هدف، در کنار سیگنال منعکس شده از آن، سیگنال‌های دیگری هم با دامنه‌ای بسیار بیشتر و یا قابل مقایسه با دامنه این سیگنال به آنتن گیرنده می‌رسد. این سیگنال‌های مزاحم کلاتر نامیده می‌شوند.

عوامل اصلی کلاتر عبارتند از:

- سیگنالی که به طور مستقیم از آنتن فرستنده به آنتن گیرنده تزویج می‌شود.

- انعکاسات چندگانه و متوالی میدان الکترومغناطیسی بین زمین و آنتن
- مشخصات الکترومغناطیسی خاک و توزیع مکانی آنها که تعیین کننده سرعت موج، تضعیف و انعکاس از خاک است.
- تفاوت مشخصات الکترومغناطیسی زمین و جسم هدف.
- ناهمواری سطح زمین که منجر به پخش میدان الکترومغناطیسی می شود.
- رابطه بین کلاتر و انعکاس از هدف به موارد بسیاری از قبیل زیر بستگی دارد:
  - ارتفاع آنتن ها
  - فاصله بین آنتن ها
  - عمق و اندازه هدف
  - مشخصات الکترومغناطیسی خاک

برای کاهش اثر کلاتر و افزایش کیفیت سیگنال دریافتی، آنتن های مورد استفاده در GPR بسیار پهن باند (UWB) انتخاب می شوند. بسته به ابعاد هدف، عمق و مشخصات الکترومغناطیسی آن و زمین، پهنای باند مناسب تعیین می شود. به عنوان مثال محدوده فرکانسی مورد نیاز در کاربردهای عمرانی و مین یابی از 1 GHz تا 5 GHz و در کاوش های زمین شناسی و باستان شناسی از 0.01 GHz تا 3 GHz است. فرکانس کاری بیشتر برای تشخیص اهداف کوچک مناسب است. برای تشخیص اهداف در عمق بیشتر، برای افزایش عمق نفوذ میدان الکترومغناطیسی در زمین باید فرکانس کاری کاهش یابد.

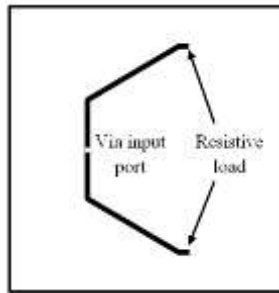
برای قابل تمیز بودن سیگنال پراکنده شده از هدف از پارازیت هایی مانند تزویج مستقیم و بازتاب از سطح زمین، بسیار ضروری است که آنتن قادر به انتقال سیگنال ورودی با تنها مقدار کمی اعوجاج باشد. محیط زمین، باتلف، پراکنده ساز و ناهمگن است؛ اما وجود این موانع اثر زیادی روی بهینه کردن مشخصات آنتن ندارند. در ضمن، تغییرات این موارد در زمین بسیار است و یک طراحی نمی تواند عمومیت داشته باشد. بنابراین، در تمام مراحل طراحی، محیط ساده و بدون تلف در نظر گرفته می شود.

این پایان نامه از پنج فصل تشکیل می شود. در فصل دوم به مرور پژوهش های پیشین و آنتن های پیشنهاد شده مختلف برای کاربردهای GPR پرداخته می شود. در فصل سوم مواد و روش های به کار رفته در طراحی آنتن مناسب در این پایان نامه بیان می گردد. فصل چهارم از دو بخش تشکیل می شود. در بخش اول، یک آنتن GPR فرکتال حلقوی و در بخش دوم، یک آنتن متناوب لگاریتمی مناسب برای GPR ارائه می گردد. فصل پنجم شامل بحث، نتیجه گیری و پیشنهادها خواهد بود.

## فصل دوم

دوقطبی سیمی، ساده‌ترین آنتن بوده که به شکل میکرواستریپی نیز ساخته می‌شود. پهنای باند این آنتن توسط روش‌های مختلف تا کنون افزایش یافته است. ویژگی‌های آنتن خطی سیمی توسط کینگ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۶ با جزئیات بررسی شده و به صورت تئوری و عملی نیز نشان داده شده است که توزیع جریان روی آنتن‌های سیمی خطی کوتاه به صورت موج ساکن است [۱]. آنتن خطی از دو جهت شبیه به خط انتقال مدار باز است. اول این که در دو انتها مدار باز است. دوم این که توزیع جریان روی این آنتن به صورت موج ساکن است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که بتوان موج رونده را روی آنتن خطی، مانند خط انتقال، با قرار دادن مقاومتی در فاصله ربع موج از انتهای آن ایجاد نمود. آلتشولر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۱ و در خلال سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۶ به بررسی روش‌های بارگذاری دوقطبی سیمی برای تبدیل آن به آنتن موج رونده پرداخت که در فصل سوم به آن‌ها اشاره شده است [۲]-[۵].

در مقاله [۶] آنتن دوقطبی میکرواستریپی تغییر یافته بارگذاری شده به عنوان آنتنی بسیار پهن‌بند مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله آنتن دوقطبی تغییر یافته UWB با زیرلایه FR4 با ضریب دی‌الکتریک ۴/۴ در بازه فرکانسی 0.1-1 GHz با بارگذاری مقاومتی در دو انتها برای کاربرد GPR معرفی شده است. بارگذاری در این آنتن موجب حصول پهنای باند وسیع و کاهش اعوجاج سیگنال شده، اما بازدهی تنها در حد 50% به دست آمده است.



شکل (۱-۲) هندسه آنتن دوقطبی تغییر یافته میکرواستریپی [۶].

آنتن Vee با حفظ سادگی آنتن دوقطبی، از مزیت جهت‌داری بالا نیز برخوردار است. در [۷] از این آنتن با پالس تحریک گوسی نرمالیزه در یک سیستم مونواستاتیک GPR استفاده شده است. به منظور کاهش انعکاس‌های داخلی سیگنال، بازوهای این آنتن به طور پیوسته بارگذاری مقاومتی به صورت خطی شده است. در این مقاله تفاوت سیگنال در ورودی آنتن، یک بار با وجود زمین و بار دیگر در فضای آزاد به دست آمده و از هم کم شده اند. سیگنال حاصل در برخی زمان‌ها دارای دامنه قابل

<sup>1</sup> King

<sup>2</sup> Altshuler