دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

تحلیل و طراحی جاذب‌های مایکروویو با استفاده از ساختارهای متامتریال

سپیده فلاح‌زاده

استاد راهنما:

دکتر کیوان فرورقی

استاد مشاور:

دکتر زهرا اطلس‌باف

زمستان 90

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

خانم سپیده فلاح زاده پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **تحلیل و طراحی جاذب ماکروویو با استفاده از ساختارهای متامتریال** در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۱ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مخابرات پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کیوان فرورقی	استاد	
استاد مشاور	دکتر زهرا اطلس باف	استادیار	
استاد ناظر	دکتر بیژن عباسی آرند	استادیار	
استاد ناظر	دکتر عباس پیرهادی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر بیژن عباسی آرند	استادیار	

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 نگارنده در رشته مخابرت – میدان است که در سال ۸۹-۹۰ در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر کیوان فرورقی ، مشاوره سرکار خانم دکتر زهرا اطلس باف 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 را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت 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 شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سپیده فلاح زاده دانشجوی رشته مخابرات – میدان مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سپیده فلاح زاده

تاریخ و امضا: ۹۱/۳/۲۷

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمي، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب سپیده فلاح زاده. دانشجوی رشته مهندسی مخابرات – میدان ورودی سال تحصیلی ۸۸-۸۹ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....

تاریخ: ۹۱/۱۲/۲۷

تقدیم

به

" پدر و مادر مهربانم "

تشکر و قدردانی

پس از شکر و سپاس فراوان به درگاه خداوند متعال، نگارنده لازم می داند از زحمات و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرامی دکتر کیوان فرورقی، استاد راهنما، و استاد محترم سرکار خانم دکتر اطلس باف، استاد مشاور این پایان نامه تقدیر و تشکر نماید. ضمنا لازم می دانم با یاد خاطره استاد گرانقدر، مرحوم دکتر حکاک، از زحمات این استاد گران‌مایه نیز تشکر نمایم. همچنین از خانواده و دوستان عزیزم که در تکمیل این پایان نامه باعث دلگرمی اینجانب بوند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

در پایان‌نامه حاضر به بررسی جاذب‌های مایکروویو پرداخته و برای بر طرف کردن کاستی‌های آنها تعدادی ساختار پیشنهاد شده است. جاذب‌هایی که برای این کار پیشنهاد شده از نوع جاذب‌های مسطح متامتریال می‌باشد. در این پایان‌نامه چندین ساختار جاذب دو لایه و یک لایه یک بانده و یک ساختار دو بانده و سه بانده طراحی و بهینه‌سازی شده است. این جاذب‌ها خصوصیاتی دارند که آنها را نسبت به کارهای گذشته برتری می‌بخشد. افزایش پهنای باند فرکانسی، پهنای باند زاویه‌ای مطلوب و متقارن و غیرحساس بودن این ساختارها نسبت به تغییر در پلاریزاسیون موج الکترومغناطیسی برخوردی از مهمترین ویژگی‌های آنها می‌باشد.

کلیه شبیه‌سازی‌ها و بهینه‌سازی‌ها با استفاده از دو نرم‌افزار HFSS و Matlab انجام گرفته است. در نهایت برای بررسی کارایی عملی این جاذب‌ها، چند نمونه از آنها ساخته و در اتاق آنتن مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفته است و نتایج عملی تطبیق خوبی با نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد.

کلید واژه: جاذب‌های راداری، متامتریال، جاذب‌های مسطح متامتریال، ساختارهای غیر حساس به پلاریزاسیون موج.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل 1 مقدمه 1
1-1- کلیات و هدف 1
2-1- ساختار کلی پایان‌نامه 4

فصل 2 تئوری و نمای کلی متامتریال‌ها 6
1-2- تعریف متامتریال 6
2-2- تاریخچه متامتریال 7
3-2- متامتریال و انتشار موج 9
4-2- انواع مختلف متامتریال 13
1-4-2- ساختارهای تشدیدی 14
1-1-4-2- امواج پلاسما و ساختار سیم نازک 15
2-1-4-2- رزوناتورهای حلقوی شکافدار 16
2-4-2- ساختارهای مبتنی بر خطوط انتقال 18
3-4-2- سطوح فرکانس گزین 20
4-4-2- کریستال‌های نوری متامتریال 21
5-2- کاربردهای متامتریال 22
1-5-2- پوشش‌ها و جاذب‌ها 22
2-5-2- شیفت دهنده‌های فاز 24
3-5-2- کاربرد متامتریال در آنتن‌ها 24

فصل 3 جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی 26
1-3- پیش‌زمینه جاذب‌های راداری 26
2-3- مکانیزم‌های تلف الکترومغناطیسی 29
3-3- نمای کلی جاذب‌های راداری 33
1-3-3- پوسته Slisbury 33
2-3-3- پوسته Jaumann 34
3-3-3- پوسته Dallenbach 35
4-3-3- پوسته‌های خازنی 36
4-3- ساختارهای تشدید کننده الکتریکی برای طراحی جاذب 37

3-4-1- جاذب‌های مسطح 37
3-4-2- اصول استفاده از ساختارهای ELC بعنوان جاذب 38
3-4-3- نمونه‌هایی از جاذب‌های مسطح ساخته شده بر اساس ساختارهای ELC 40

فصل 4 جاذب‌های متامتریال مسطح غیرحساس به پلاریزاسیون 49
4-1- جاذب‌های دو لایه 49
4-1-1- سیستم شبیه‌سازی 50
4-1-2- ارائه ساختارها 53
4-2- جاذب‌های یک لایه 62
4-3- ساختار دو بانده غیرحساس به تغییر پلاریزاسیون 70

فصل 5 نتیجه‌گیری و پیشنهادات 82
5-1- خلاصه و نتیجه‌گیری 82
5-2- پیشنهاداتی برای ادامه کار 83

ضمیمه أ- برنامه مطلب برای استخراج پارامترهای ساختاری جاذب 84

فهرست مراجع 86

واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی 90

واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی 91

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
میانگین ابعاد سلول واحد یک ساختار	p
طول موج موجبری در فرکانس مرکزی	λ_g
ثابت گذردهی الکتریکی	ε
ثابت نفوذپذیری مغناطیسی	μ
اندیس انکسار	n
شدت میدان الکتریکی	E
شدت میدان مغناطیسی	H
عدد موج	k
فرکانس	ω
سرعت نور	c
بردار پوینتینگ	S
ثابت انتشار مختلط	γ
ثابت تلف	α
ثابت فاز	β
امپدانس مشخصه	η
بردار حرکت موج	r
فرکانس پلاسما	ω_p
چگالی الکترون	N
بار یک الکترون	e
جرم موثر الکترون‌ها	m_{eff}
سرعت الکترون	v
رسانایی ماده	σ
سوسپتانس	B
راکتانس	X
هدایت الکتریکی	G
امپدانس در واحد طول خط انتقال	z
ادمیتانس در واحد طول خط انتقال	y
سطح مقطع راداری	$\sigma_{\phi\theta}$
توان	P

ثابت تلف الکتریکی ..... δ

ثابت تلف مغناطیسی ..... δ_m

ضریب انعکاس ..... R

ضریب انتقال ..... T

ضریب جذب ..... A

ضریب انعکاس جزئی ..... Γ

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول 2-1. علامت ضریب شکست به ازای علامت‌های مختلف گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی 13

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل 2-1. الف) اثر داپلر در یک ماده دست راستی و ب) اثر داپلر در یک ماده دست چپی. A منبع موج و B گیرنده است [14]. 9
شکل 2-2. آرایه ای از سیم ها در امتداد محور z که در شبکه ای مربعی در صفحه x-y شکل گرفته اند و نشان داده شد که می تواند ε منفی تولید کند [16]. 10
شکل 2-3. آرایه‌ای از حلقه‌های شکافدار رزونانسی (SRR) که نشان داده شده می‌تواند μ منفی ایجاد کند [17]. 10
شکل 2-4. ساختار دست چپی ارائه شده توسط Smith و همکارانش [18]. 11
شکل 2-5. ساختار یک ماده دست چپی دو بعدی [21]. 11
شکل 2-6. سیستم بردارهای E، H، k و S در انتشار یک موج الکترومغناطیسی متعامد مسطح (TEM) در الف) یک ماده معمولی و ب) یک ماده دست چپی. 14
شکل 2-7. آرایه ای از سیم‌های مسی استوانه‌ای [17]. 17
شکل 2-8. (الف) استوانه‌ای با سطح مقطع حلقه شکافدار و (ب) نفوذپذیری مغناطیسی موثر آرایه‌ای از استوانه‌های با سطح مقطع حلقه شکافدار بر حسب فرکانس [17]. 18
شکل 2-10. مدار معادل یک خط انتقال دست چپی-دست راستی. 20
شکل 2-11. هندسه چندین ساختار متداول برای طراحی سطوح فرکانس گزین. 21
شکل 1.3. انعکاس‌ها و انتقال‌ها برای یک جاذب تلف دار با لایه پشتی PEC 32
شکل 3-2. (الف) رزوناتور الکتریکی روی یک لایه جداکننده دی‌الکتریک، (ب) تکه سیم روی یک زیرلایه دی‌الکتریک، (ج) نمایی کامل از ساختار چند لایه جاذب [60]. 41
شکل 3-3. بیان پارامتری ساختار جاذب [59]. 42
شکل 3-4. نتایج حاصل از شبیه‌سازی. R(ω) با رنگ سبز و A(ω) با رنگ قرمز و T(ω) با رنگ آبی نشان داده شده است [59]. 43
شکل 3-5. (الف) سیستم تست ساختار جاذب و نتایج انعکاس و انتقال بدست آمده از شبیه‌سازی و تست، (ب) مقایسه نمودار جذب بدست آمده از شبیه‌سازی و تست و درون یابی گوسی نمونه‌های حاصل از تست (خط چین) [59]. 44
شکل 3-6. توزیع شدت میدان الکتریکی در (الف) تکه سیم و (ب) ساختار ELC و چگالی جریان سطحی در (ج) تکه سیم و (د) ساختار ELC [59]. 44
شکل 3-7. جاذب متامتریال برای محدوده تراهرتز (الف) ساختار ELC (ب) نمایی کامل از جاذب با دو لایه دی‌الکتریک و دو لایه فلز (ج) تصویری از ساختار جاذب ساخته شده [61]. 45
شکل 3-8. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای جاذب متامتریال برای تشعشع برخوردی (الف) TM و (ب) TE [61]. 45

شکل 3-9. (الف) دید از بالای ساختار جاذب، (ب) نمایی دیگر از جاذب و جهت میدان الکترومغناطیسی برخوردی (ج) ساختار جاذب ساخته شده [62] 46
شکل 3-10. نمودار جذب بر حسب فکانس برای (الف) میدان الکتریکی در راستای محور x، (ب) میدان الکتریکی در جهت 45° در صفحه x-y، (ج) چگالی جریان‌های سطحی در صفحه فلزی و ساختار ELC، (د) شدت میدان الکتریکی در ساختار ELC [62]. 46
شکل 3-11. نمایی از (الف) ساختار جاذب و جهت موج برخوردی به آن، (ب) تکه سیم روی زیرلایه، (ج) ساختار ELC پیاده‌سازی شده روی FR4 [63]. 47
شکل 3-12. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انعکاس، انتقال و جذب ساختار شکل 3-11 [63] 47
شکل 4-1. (الف) و (ب) ساختارهای ELC استفاده شده در طراحی جاذب‌ها. 50
شکل 4-2. (الف) Floque Port در وجوه بالا و پایین جعبه هوا، (ب) و (ج) ساختار Master-Slave در وجوه جانبی جعبه هوا. 51
شکل 4-3. (الف) موج الکترومغناطیسی برخوردی، (ب) PML روی دو وجه بالا و پایین جعبه هوا، (ج) و (د) ساختار Master-Slave در وجوه جانبی جعبه هوا. 52
شکل 4-4. (الف) ساختار صلیب شکل که روی یک لایه FR4 به عنوان زیرلایه قرار گرفته، (ب) ساختار ELC روی لایه‌ای از FR4 که فاصله بین دو ساختار فلزی را پر کرده است. 53
شکل 4-5. مقدار دامنه انعکاس، انتقال و جذب مربوط به ساختار ارائه شده در شکل 4-4. 55
شکل 4-6. توزیع میدان الکتریکی در ساختار جاذب. 56
شکل 4-7. چگالی جریانهای سطحی در فرکانس زرونانس روی (الف) ساختار ELC و (ب) ساختار فلزی صلیب شکل. 56
شکل 4-8. نمودار پارامترهای (الف) $\mu(\omega)$ ، (ب) $\varepsilon(\omega)$ ، (ج) $z(\omega)$ و (د) $n(\omega)$ برای جاذب شکل 4-4. 57
شکل 4-9. دامنه جذب ساختار جاذب شکل 4-4 بر حسب زوایای برخورد متفاوت. 58
شکل 4-10. (الف) ساختار ELC روی دی‌الکتریک، (ب) ساختار فلزی لایه دوم روی دی‌الکتریک و (ج) نمایی دیگر از ساختار جاذب دوم. 59
شکل 4-11. مقدار دامنه انعکاس، انتقال و جذب مربوط به ساختار ارائه شده در شکل 4-10. 59
شکل 4-12. نمودار پارامترهای (الف) $\mu(\omega)$ ، (ب) $\varepsilon(\omega)$ ، (ج) $z(\omega)$ و (د) $n(\omega)$ برای جاذب شکل 4-10. 60
شکل 4-13. (الف) ساختار ELC و (ب) ساختار فلزی لایه دوم، روی دی‌الکتریک و (ج) نمایی دیگر از ساختار جاذب سوم. 61
شکل 4-14. مقدار دامنه انعکاس، انتقال و جذب مربوط به ساختار ارائه شده در شکل 4-13. 62
شکل 4-15. ساختار جاذب یک لایه اول (الف) نمایی از بالا و (ب) نمایی از پهلو. 63
شکل 4-16. دامنه انعکاس و جذب ساختار نشان داده شده در شکل 4-15. 63
شکل 4-17. دامنه جذب ساختار جاذب شکل 4-15 بر حسب زوایای برخورد متفاوت. 64
شکل 4-18. توزیع میدان الکتریکی درون ساختار ELC در فرکانس رزونانس. 65

شکل 4-19. چگالی جریان الکتریکی در فرکانس تشدید روی سطح (الف) ساختار ELC و (ب) صفحه زمین (میدان الکتریکی در راستای جریان تولید شده در ELC می‌باشد). 65
شکل 4-20. نمودار پارامترهای (الف) $\mu(\omega)$ ، (ب) $\varepsilon(\omega)$ ، (ج) $z(\omega)$ و (د) $n(\omega)$ برای جاذب شکل 4-15. 66
شکل 4-21. سیستم تست در آزمایشگاه آنتن 67
شکل 4-22. (الف) ساختار جاذب ساخته شده به صورت بورد PCB، (ب) نتایج انعکاس حاصل از شبیه سازی (خط توپر) و تست (خط تیره) بر حسب dB 67
شکل 4-23. نمودار دامنه جذب برای ε_r برای دی‌الکتریک. 68
شکل 4-24. افزایش دامنه و پهنای باند جذب با افزایش تانژانت تلفات تا یک مقدار بهینه. 69
شکل 4-25. کاهش دامنه جذب با افزایش تانژانت تلفات بیشتر از مقدار بهینه. 69
شکل 4-26. ساختار جاذب یک لایه دوم (الف) نمایی از بالا و (ب) نمایی از پهلو. 70
شکل 4-27. دامنه انعکاس و جذب ساختار نشان داده شده در شکل 4-26. 70
شکل 4-28. ساختار یک جاذب دو بانده با ترکیب دو ELC [65]. 71
شکل 4-29. (الف) و (ب) میزان جذب به ترتیب در هر یک از المان‌های سازنده ساختار و ساختار دو بانده، (ج) و (د) تولید جریان‌های موازی و خلاف جهت در صفحات فلزی ساختار [65]. 72
شکل 4-30. (الف) ساختار ELC استفاده شده، (ب) ساختار یک سلول واحد جاذب و (ج) نمونه ساخته شده جاذب به صورت آرایه‌ای از ساختار سلول واحد نشان داده شده در قسمت (ب) [67]. . 72
شکل 4-31. دامنه ضریب جذب و انعکاس از ساختار نشان داده شده در شکل 4-30 [67]. 73
شکل 4-32. (الف) ساختار ساخته شده جاذب دو لایه دو بانده و (ب) ساختار لایه‌های یک سلول واحد از این جاذب [68]. 74
شکل 4-33. دامنه انعکاس از ساختار جاذب در سه باند فرکانسی متفاوت بر حسب dB [68]. 74
شکل 4-34. ساختار جاذب دو بانده یک لایه (الف) دید از بالا و (ب) دید از پهلو. 75
شکل 4-35. دامنه ضریب انعکاس و ضریب جذب ساختار نشان داده شده در شکل 4-34. 75
شکل 4-36. دامنه جذب ساختار شکل 4-34 بر حسب زوایای برخورد متفاوت. 76
شکل 4-37. توزیع شدت میدان الکتریکی (الف) در فرکانس تشدید اول 6.04 GHz و (ب) در فرکانس تشدید دوم 9.72 GHz. 77
شکل 4-38. چگالی جریان سطحی تولید شده در فرکانس‌های تشدید (الف) روی ساختار SR و ELC و (ب) روی زمین جاذب (میدان الکتریکی در راستای جریان تولید شده در صفحه زمین). 77
شکل 4-39. پارامترهای ساختاری جاذب دو بانده (الف) $\varepsilon(\omega)$ و (ب) $\mu(\omega)$ در فرکانس پیک اول 6.04 GHz و (ج) $\varepsilon(\omega)$ و (د) $\mu(\omega)$ در فرکانس پیک دوم 9.72 GHz. 78
شکل 4-40. (الف) ساختار جاذب دو بانده ساخته شده به صورت بورد PCB، (ب) نتایج انعکاس حاصل از شبیه سازی (خط توپر) و تست در اتاق آنتن (خط تیره) 79
شکل 4-41. ساختار سه بانده (الف) دید از بالا و (ب) دید از پهلو. 79
شکل 4-42. دامنه ضریب انعکاس و جذب ساختار نشان داده شده در شکل 4-40. 80

شکل 4-43. توزیع میدان الکتریکی در ساختار جاذب در فرکانس‌های (الف) 16.7 GHz ، (ب) 9.95 GHz و (ج) 6.5 GHz 81
شکل 4-44. توزیع چگالی جریان الکتریکی روی (الف) سطح فلزی رویی جاذب و (ب) زمین جاذب 81

فصل 1 مقدمه

1-1- کلیات و هدف

پراکندگی از مهمترین مباحث الکترومغناطیس می‌باشد. از جمله پرکاربردترین پارامترهای پراکندگی سطح مقطع رادار[1] است [1]. سطح مقطع راداری در واقع بیانگر توانایی یک هدف در پراکنده کردن انرژیی می‌باشد که توسط یک موج برخوردی به آن وارد می‌شود. سطح مقطع پراکندگی را می‌توان در سه ناحیه کلی با توجه به نسبت طول موج به ابعاد جسم توصیف کرد. این سه ناحیه عبارتند از پراکندگی فرکانس پایین، پراکندگی ناحیه تشدید و ناحیه نوری فرکانس بالا [2]. در هر یک از این سه ناحیه مکانیزم‌های پراکندگی و عوامل موثر بر آن متفاوت است.

از آنجا که در اغلب کاربردهای مورد بررسی ابعاد خیلی بزرگتر از طول موج می‌باشد، پراکندگی در ناحیه نوری فرکانس بالا رخ می‌دهد. بنابراین از روشهایی خاص مانند اوپتیک هندسی[2]، اوپتیک فیزیکی[3]، تئوری هندسی انکسار[4]، روش جریان‌های معادل[5] و ... و همچنین مدل کردن اهداف پیچیده با استفاده از المان‌های ساده و کوچک‌تر خاص برای تعیین سطح مقطع راداری اجسام استفاده می‌شود [1-8].

از تعریف سطح مقطع راداری واضح است که هر چه سطح مقطع یک هدف بیشتر باشد انرژی بیشتری را پراکنده می‌سازد، پس امکان اینکه هدف توسط ابزارهای آشکارسازی دیده شود بیشتر خواهد بود. با پیشرفت فزاینده سیستم‌های آشکارسازی، لزوم کاهش سطح مقطع راداری در بسیاری از کاربردها به منظور افزایش قابلیت مقاومت در برابر دشمن بیش از پیش اهمیت می‌یابد. از جمله

[1] Radar Cross Section (RCS)
[2] Geometric Optics
[3] Physical Optics
[4] Geometrical Theory of Diffraction
[5] The Method of Equivalent Currents

مهمترین روش‌های کاهش سطح مقطع راداری تغییر شکل[1] ساختار (هدفی که می‌خواهیم سطح مقطع راداری آن کاهش یابد) و استفاده از مواد جاذب راداری[2] (RAMs) روی سطوح آن می‌باشد [2]. معمولا یک روش به تنهایی نمی‌تواند سطح مقطع راداری هدف را به میزان مورد نیاز کاهش دهد، بنابراین از ترکیبی از روش‌های مختلف برای این کار استفاده می‌شود. تغییر شکل روشی مناسب برای اعمال در مقاطع خطر[3] جسم می‌باشد. اما با توجه به محدودیت‌هایی که براساس برخی ماموریت‌های خاص به دستگاه وارد می‌شود نمی‌توان به راحتی تغییر شکل را در هر ناحیه‌ای به آن اعمال کرد. همچنین این روش در همه زوایای دید به یک اندازه کاهش در سطح مقطع ایجاد نمی‌کند و حتی ممکن است در برخی نقاط باعث افزایش آن شود. به علاوه این روش می‌تواند بسیار گران قیمت نیز باشد [2]. در نتیجه به راهکار تکمیل کننده و موثر دیگری نیز برای کاهش موثر سطح مقطع راداری نیاز است.

مواد جاذب راداری برای قسمت‌هایی که شکل آنها نمی‌تواند بهینه شود و یا تغییر شکل به تنهایی برای کاهش سطح مقطع کافی نباشد، استفاده می‌شود. شیوه عملکرد این ساختارها چنین است که برای کاهش ضریب انعکاس و ضریب انتقال موج از ساختار، انرژی موج برخوردی وارد لایه جاذب شده و در آن جذب می‌شود. این جذب به واسطه مکانیزم‌های اتلاف در ماده جاذب رخ می‌دهد. در واقع اساس کار مواد جاذب این است که ماده چه وجود داشته باشد (طبیعی) و چه ساخته شود (مصنوعی)، دارای شاخص انکسار مختلط بزرگ باشد. در شاخص انکسار یک ماده، که شامل آثار الکتریکی و مغناطیسی آن است، قسمت موهومی نشان دهنده فاکتور تلف آن می‌باشد [2]. در ادامه در فصول بعد به تشریح درباره اصول طراحی این ساختارها بحث خواهیم کرد.

تاکنون جاذب‌های مختلفی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. اولین و ساده‌ترین این ساختارها در سال 1952 توسط یک مهندس آمریکایی ارائه شد که پرده Salisbury نام داشت [9]. تا مدت‌ها این

[1] Shaping
[2] Radar Absorbing Material
[3] Threat Sector

جاذب و انواع پیشرفته‌تر آن، که با چند لایه کردن ساختار اولیه تولید شدند، مطلوب و پرکاربرد بودند. اما عیب عمده این ساختارها ضخامت زیاد آنها بود که وابسته به فرکانس کار جاذب تغییر می‌کرد. پس از آن استفاده از دی‌الکتریک‌ها و مواد مغناطیسی تلف‌دار متداول شد [10 و 11]. ساخت این مواد پیچیده و پرهزینه بود و در همه فرکانس‌ها نیز به راحتی قابل پیاده سازی نبودند. پس از این ساختارها، استفاده از لایه‌های خازنی و همچنین بکارگیری عناصر فشرده مورد بررسی قرار گرفت [12 و 13]. استفاده از عناصر فشرده دارای مزیت ایجاد پهنای باند وسیع است اما پیاده‌سازی آن دشوار و گران می‌باشد. از همین رو به مواد دیگری نیاز است که بتواند ویژگی خازنی و اتلاف کافی برای ساختار جاذب را در اختیار قرار دهد و ویژگی‌های نامطلوب نمونه‌های قبلی را نداشته باشد.

از جدیدترین موضاعات در بحث طراحی جاذب‌ها استفاده از گروه جدیدی از مواد به نام متامتریال[1] می‌باشد. متامتریال‌ها به صوت کلی به عنوان ساختارهای الکترومغناطیسی همگن موثر مصنوعی شناخته می‌شوند که خصوصیات غیرمعمولی از خود نشان می‌دهند که در طبیعت به راحتی یافت نمی‌شود. این ساختارها معمولا با استفاده از چندین ماده یا با ساختن یک الگو روی یک ماده بدست می‌آید. تاریخچه متامتریال از سال 1967 با یک بررسی نظری در مورد وجود "اجسام با مقدار ε و μ منفی" توسط فیزیکدانی روسی به نام Victor Veselago آغاز شد و در ادامه توسط مطالعات برجسته J. B. Pendary و همکارانش و D. R. Smith و همکارانش تبدیل به یک موضوع جذاب برای محققان در علوم متفاوت شد [14-18].

تحقیقات در زمینه متامتریال‌ها و خواص و کاربردهای گسترده آن موضوعی میان رشته‌ای می‌باشد و شامل شاخه‌های مختلفی از علوم از قبیل مهندسی الکترونیک، الکترومغناطیس، فیزیک حالت جامد، مهندسی مایکروویو و آنتن، الکترونیک نوری، اپتیک کلاسیک، مهندسی مواد، طراحی نیمه هادی‌ها، نانوالکترونیک و غیره می‌باشد [19].

[1] Metamaterial