

الله اعلم  
الله اعلم  
الله اعلم



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده فنی مهندسی ، گروه برق

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

مهندسی برق، گرایش الکترونیک

**عنوان :**

مطالعه و شبیه سازی فرامواد با ضریب شکست منفی در ناحیه فرکانسی میکروویو

**استاد راهنما :**

دکتر محمد کاظم مروج فرشی

**استاد مشاور :**

دکتر علیرضا کاشانی نیا

**پژوهشگر :**

فاطمه نجفی

بهار ۱۳۹۱

تقدیم بہ فرشتگان مہربان زندگی

پدر و مادر عزیزم

## تشکر و قدردانی

اکنون که با یاری خداوند توفیق تهیه و تدوین این مجموعه ناچیز را یافته‌ام بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر مروج فرشی که با راهنماییهای موثر خود من را در به انجام رسیدن این پایان نامه یاری نمودند و همچنین جناب آقای دکتر کاشانی‌نیا که زحمت مشاوره این پایان نامه را برعهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

از پدر و مادر عزیزم که با کمک‌های معنوی خود همواره مشوق من در تهیه این مجموعه بودند کمال تشکر را دارم. از خواهر عزیزم مهنا و دوستان مهربانم خانم‌ها مهندس فاطمه کشاورز و مهندس سپیده فلاح زاده که در طول مدت تحصیل مرا مورد لطف و عنایت خود قرار دادند، بسیار سپاسگزارم.

فاطمه نجفی

بهار ۹۱

## چکیده

در این پایان نامه به بررسی فرامواد به عنوان موادی مصنوعی با ویژگی‌هایی ممتاز و منحصر به فرد که در طبیعت یافت نمی‌شود، می‌پردازیم. مفاهیم پایه و ویژگی‌های انتقال امواج الکترومغناطیس در فرامواد را مورد مطالعه قرار داده و مواد با گذردهی الکتریکی منفی و نفوذپذیری مغناطیسی منفی را به عنوان اجزای تشکیل دهنده فرامواد با ضریب شکست منفی بررسی می‌کنیم. سپس فراماده تشدیدگر حلقوی شکافدار را به عنوان ساختاری متداول در طراحی فرامواد مغناطیسی به تفصیل شرح داده و به کمک شبیه سازی در نرم افزار Ansoft HFSS تأثیر پارامترهای هندسی تشدیدگر حلقوی را بر جابه‌جایی فرکانس تشدید آن بررسی می‌نماییم.

در این تحقیق برای اولین بار فرامواد مغناطیسی با دو بستر دی‌الکتریک را بررسی کرده و با استفاده از مدل بیلاتی و مدل گنورگین برای محاسبه‌ی خازن مسطح چندلایه روابط تحلیلی برای فرامواد مغناطیسی تشدیدگر حلقوی شکافدار و تشدیدگر ماریچ با دو بستر دی‌الکتریک در بالا و پایین ساختار ارائه می‌دهیم. به منظور بررسی صحت مدل ارائه شده آن را با نتایج حاصل از شبیه سازی ساختارها در نرم افزار HFSS مقایسه می‌کنیم. بیشینه خطای مدل تحلیلی برای فراماده تشدیدگر حلقوی ۴٪ و برای فراماده تشدیدگر ماریچ ۲/۸۵٪ به دست می‌آید. در هر دو حالت رابطه‌ی فرکانس تشدید برحسب ثابت دی‌الکتریک بستر دوم را به دست می‌آوریم. یک نمونه کاربردی برای فراماده مغناطیسی با دو بستر دی‌الکتریک را به عنوان حسگر رطوبت خاک بررسی کرده و با مدل ارائه شده رفتار این حسگر را تحلیل می‌کنیم. همچنین حالتی که بستر دی‌الکتریک دوم در زیر تشدیدگر و بستر دی‌الکتریک اول باشد را بررسی می‌کنیم و با استفاده از تکنیک PCM روابط تحلیلی مدل بیلاتی را برای دو بستر دی‌الکتریک اصلاح می‌کنیم. در این حالت نتایج روابط تحلیلی تطبیق خوبی را با نتایج شبیه سازی عددی داشته و بیشینه خطایی در حدود ۱/۲٪ را نشان می‌دهد.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه و تاریخچه فرامواد
۱	۱-۱ مقدمه
۱	۲-۱ تاریخچه
۶	فصل دوم: مفاهیم پایه در فرامواد
۶	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲ ویژگی‌های انتقال در فرامواد
۱۰	۱-۲-۲ گذردهی الکتریکی منفی
۱۱	۲-۲-۲ نفوذ پذیری مغناطیسی منفی
۱۴	۳-۲-۲ فرامواد با ضریب شکست منفی
۱۷	فصل سوم: تشدیدگر حلقوی شکاف دار
۱۷	۱-۳ مقدمه
۱۸	۲-۳ شبیه سازی ساختار SRR با نرم افزار Ansoft HFSS
۲۱	۳-۳ فرایند تشدید الکترومغناطیسی در SRR
۲۳	۴-۳ پارامترهای هندسی SRR و تاثیرات آنها بر فرکانس تشدید
۲۴	۱-۴-۳ تاثیر اندازه شکاف (d) حلقه‌ها
۲۴	۲-۴-۳ تاثیر پهنای حلقه‌ها (w)
۲۵	۳-۴-۳ تاثیر اندازه شکاف بین حلقه داخلی و خارجی (t)
۲۶	۴-۴-۳ تاثیر ضریب دی الکتریک زیر لایه ( $\epsilon_{substrate}$ )
۲۷	۵-۴-۳ تاثیر ضخامت زیر لایه (p)
۲۸	۵-۳ تشدیدگر حلقوی مربعی
۳۰	۶-۳ شبیه سازی سلول واحد فراماده با ضریب شکست منفی در HFSS

فصل چهارم: مدل تحلیلی برای فرامواد مغناطیسی	۳۵
۱-۴ مقدمه	۳۵
۲-۴ مدل تحلیلی تشدیدگر چند حلقوی شکاف‌دار (MSRR)	۳۵
۱-۲-۴ مدل تحلیلی MSRR بدون حضور زیرلایه دی‌الکتریک	۳۵
۲-۲-۴ مدل تحلیلی MSRR در حضور زیرلایه دی‌الکتریک و لحاظ کردن تلفات	۴۱
۳-۴ مدل تحلیلی تشدیدگر ماریپچ	۴۶
۱-۳-۴ مدل تحلیلی تشدیدگر ماریپچ بدون حضور زیرلایه دی‌الکتریک	۴۶
۲-۳-۴ مدل تحلیلی تشدیدگر ماریپچ در حضور زیرلایه دی‌الکتریک و لحاظ کردن تلفات	۵۴
۴-۴ مدل تحلیلی تشدیدگر لایرینت	۵۶
۵-۴ ضریب کیفیت و تابع نفوذ پذیری مغناطیسی	۶۰
۱-۵-۴ ضریب کیفیت	۶۰
۲-۵-۴ تابع نفوذ پذیری مغناطیسی	۶۱
فصل پنجم: مدل تحلیلی برای فرامواد مغناطیسی با دو بستر دی‌الکتریک	۶۴
۱-۵ مقدمه	۶۴
۲-۵ ساختار فراماده تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار با دو بستر دی‌الکتریک	۶۴
۱-۲-۵ در حالی که ساختار بین دو بستر قرار گیرد	۶۴
۲-۲-۵ مدل تحلیلی برای SRR با دو بستر دی‌الکتریک	۶۶
۳-۲-۵ نتایج شبیه سازی و روابط تحلیلی	۶۹
۴-۲-۵ مثالی کاربردی، حسگر رطوبت خاک	۷۱
۵-۲-۵ ساختار حسگر رطوبت خاک	۷۲
۶-۲-۵ نتایج شبیه سازی و روابط تحلیلی	۷۳
۷-۲-۵ در حالی که ساختار در بالای بسترهای دی‌الکتریک باشد	۷۴
۸-۲-۵ نتایج شبیه سازی و روابط تحلیلی	۷۷
۳-۵ ساختار فراماده تشدیدگر ماریپچ با دو بستر دی‌الکتریک	۷۸

۷۹	..... ۱-۳-۵ مدل تحلیلی برای SR با دو بستر دی الکتریک
۸۲	..... ۲-۳-۵ نتایج شبیه سازی و روابط تحلیلی
۸۴	..... فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۴	..... ۱-۶ نتیجه گیری
۸۵	..... ۲-۶ پیشنهاد برای ادامه ی کار
۸۶	..... فهرست مراجع



## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ آرایه‌ای از سیم‌های فلزی نازک [۴].....	۲
شکل ۱-۲ ساختار تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار ساخته شده از یک رسانای غیر مغناطیسی [۶].....	۲
شکل ۱-۳ ساختار اولین ماده چپ‌گرد [۷].....	۳
شکل ۱-۲ بردارهای $\{\bar{E}, \bar{H}, \bar{k}\}$ برای مواد با ضرایب منفی $\epsilon$ و $\mu$ ، چپگرد هستند (الف) و برای ضرایب مثبت $\epsilon$ و $\mu$ ، راستگرد هستند (ب) [۳۰].....	۸
شکل ۲-۲ نمودار $\epsilon - \mu$ (تقسیم بندی محیط از لحاظ علامت ضرایب $\epsilon$ و $\mu$ ) [۳۰].....	۹
شکل ۲-۳ شماتیک آرایه‌ای از سیم‌های فلزی. $a$ ثابت شبکه، $r$ شعاع هر سیم است [۳۰].....	۱۱
شکل ۲-۴ (الف) ساختار سویس رل (ب) ساختار تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار [۳۰].....	۱۲
شکل ۲-۵ نمودار نفوذپذیری مغناطیسی موثر ( $\mu_{eff}$ ) برحسب تابعی از فرکانس زاویه ای ( $W$ ) برای ساختار یک SRR [۶].....	۱۴
شکل ۲-۶ شماتیک شکست نور در عبور از (الف) محیط با ضریب شکست مثبت (ب) محیط با ضریب شکست منفی [۳۰].....	۱۵
شکل ۲-۷ عدسی از جنس فراماده اگر محدب باشد نور را واگرا و اگر مقعر باشد همگرا می‌کند.....	۱۴
شکل ۳-۱ شماتیک (الف) آرایه‌ای متناوب از ساختار SRR (ب) یک سلول واحد SRR [۳۰].....	۱۷
شکل ۳-۲ سلول واحد SRR مورد مطالعه در این بخش [۳۰].....	۱۸
شکل ۳-۳ سلول واحد SRR شبیه سازی شده در HFSS. در این شکل پورت‌های موج ورودی و خروجی و صفحات PEC/PMC نشان داده شده اند.....	۲۰
شکل ۳-۴ پارامتر پراکندگی $S_{21}$ حاصل از شبیه سازی سلول واحد مورد نظر در HFSS.....	۲۱
شکل ۳-۵ ساختار سلول واحد CSRR.....	۲۲
شکل ۳-۶ پارامترهای پراکندگی $S_{21}$ حاصل از شبیه سازی ساختارهای SRR و CSRR در HFSS.....	۲۲
شکل ۳-۷ پارامترهای پراکندگی $S_{21}$ بدست آمده از شبیه سازی ساختار تشدیدگر حلقوی در HFSS برای مقادیر مختلف شکاف حلقه ( $d$ ).....	۲۴

- شکل ۳-۸ پارامترهای پراکندگی S21 بدست آمده از شبیه سازی ساختار تشدیدگر حلقوی در HFSS برای مقادیر مختلف پهنای حلقه (W) ..... ۲۵
- شکل ۳-۹ پارامترهای پراکندگی S21 بدست آمده از شبیه سازی ساختار تشدیدگر حلقوی در HFSS برای مقادیر مختلف شکاف بین حلقه داخلی و خارجی (t) ..... ۲۶
- شکل ۳-۱۰ پارامترهای پراکندگی S21 بدست آمده از شبیه سازی ساختار تشدیدگر حلقوی در HFSS برای مقادیر مختلف ضریب دی الکتریک زیرلایه ( $\epsilon_{substrate}$ ) ..... ۲۷
- شکل ۳-۱۱ پارامترهای پراکندگی S21 بدست آمده از شبیه سازی ساختار تشدیدگر حلقوی در HFSS برای مقادیر مختلف ضخامت زیرلایه دی الکتریک (p) ..... ۲۸
- شکل ۳-۱۲ سلول واحد QSRR شبیه سازی شده در HFSS. در این شکل پورت های موج ورودی و خروجی و صفحات PEC/PMC نشان داده شده اند. .... ۲۹
- شکل ۳-۱۳ شماتیک دوبعدی سلول واحد QSRR ..... ۲۹
- شکل ۳-۱۴ پارامترهای پراکندگی S21 و S12 حاصل از شبیه سازی تشدیدگر QSRR در HFSS ..... ۳۰
- شکل ۳-۱۵ دو نما از شبیه سازی تک سلول واحد فراماده با ضریب شکست منفی در نرم افزار HFSS ..... ۳۱
- شکل ۳-۱۶ اندازه پارامترهای S سلول واحد فراماده شکل ۳-۱۵ ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۷ فاز پارامترهای S سلول واحد فراماده شکل ۳-۱۵ ..... ۳۲
- شکل ۳-۱۸ گذردهی الکتریکی موثر سلول واحد فراماده شکل ۳-۱۵ ..... ۳۳
- شکل ۳-۱۹ نفوذ پذیری مغناطیسی موثر سلول واحد فراماده شکل ۳-۱۵ ..... ۳۳
- شکل ۳-۲۰ ضریب شکست سلول واحد فراماده شکل ۳-۱۵ ..... ۳۴
- شکل ۴-۱ ساختار تشدیدگر MSRR با  $N=4$  حلقه شکاف دار [۳۹] ..... ۳۶
- شکل ۴-۲ مدار معادل شبه استاتیک MSRR با ۴ حلقه [۳۹] ..... ۳۷
- شکل ۴-۳ خازن معادل ساختار  $C_{MSRR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) برای حالت [۳۹] ..... ۳۹
- شکل ۴-۴ ظرفیت سلفی معادل ساختار  $L_{MSRR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) برای حالت [۳۹] ..... ۴۰
- شکل ۴-۵ فرکانس تشدید MSRR برحسب تعداد حلقه ها (N): مقایسه میان شبیه سازی ها عددی تمام موج با نتایج تحلیلی مدل ارائه شده برای چهار ساختار متفاوت MSRR با همان ابعاد ارائه شده در شکل ۳-۴ [۳۹] ..... ۴۱

- شکل ۴-۶ ساختار تشدیدگر MSRR با N حلقه شکاف دار و با حضور زیرلایه دی الکتریک به ضخامت  $h$  [۴۲]..... ۴۲
- شکل ۴-۷ مدار معادل شبه استاتیک MSRR مربوط به شکل ۴-۶ و با در نظر گرفتن تلفات [۴۲]..... ۴۳
- شکل ۴-۸ فرکانس تشدید معادل ساختار MSRR برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از روش های تحلیلی، شبیه سازی و اندازه گیری. [۴۲]..... ۴۵
- شکل ۴-۹ ساختار تشدیدگر حلزونی با  $N=12$  دور [۳۹]..... ۴۶
- شکل ۴-۱۰ مدل مداری شبه استاتیک ساختار SR [۳۹]..... ۴۶
- شکل ۴-۱۱ خازن معادل ساختار  $C_{SR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از سه مدل متفاوت: مربع نمایانگر مدل مرجع [۴۳]، دایره مدل مراجع [۴۰ و ۴۱] و مثلث مدل بیلاتی می باشد. [۳۹]..... ۴۹
- شکل ۴-۱۲ خازن معادل ساختار  $C_{SR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از سه مدل متفاوت: مربع نمایانگر مدل مرجع [۴۳]، دایره مدل مراجع [۴۰ و ۴۱] و مثلث مدل بیلاتی می باشد. [۳۹]..... ۴۹
- شکل ۴-۱۳ خازن معادل ساختار  $C_{SR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از سه مدل متفاوت: مربع نمایانگر مدل مرجع [۴۳]، دایره مدل مراجع [۴۰ و ۴۱] و مثلث مدل بیلاتی می باشد. [۳۹]..... ۵۰
- شکل ۴-۱۴ سلف معادل ساختار  $L_{SR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از سه مدل متفاوت: مربع نمایانگر مدل مرجع [۴۳]، دایره مدل مراجع [۴۰ و ۴۱] و مثلث مدل بیلاتی می باشد. [۳۹]..... ۵۱
- شکل ۴-۱۵ سلف معادل ساختار  $L_{SR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از سه مدل متفاوت: مربع نمایانگر مدل مرجع [۴۳]، دایره مدل مراجع [۴۰ و ۴۱] و مثلث مدل بیلاتی می باشد. [۳۹]..... ۵۱
- شکل ۴-۱۶ سلف معادل ساختار  $L_{SR}$  برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از سه مدل متفاوت: مربع نمایانگر مدل مرجع [۴۳]، دایره مدل مراجع [۴۰ و ۴۱] و مثلث مدل بیلاتی می باشد. [۳۹]..... ۵۲
- شکل ۴-۱۷ فرکانس تشدید SR برحسب تعداد حلقه ها (N) به دست آمده از شبیه سازی تمام موج و سه مدل متفاوت از مراجع [۴۳]، [۴۰ و ۴۱] و [۳۹]..... ۵۳

- شکل ۴- ۱۸ فرکانس تشدید SR برحسب تعداد حلقه‌ها ( $N$ ) به دست آمده از شبیه سازی تمام موج و سه مدل متفاوت از مراجع [۴۳]، [۴۰ و ۴۱] و [۳۹]..... ۵۳
- شکل ۴- ۱۹ فرکانس تشدید SR برحسب تعداد حلقه‌ها ( $N$ ) به دست آمده از شبیه سازی تمام موج و سه مدل متفاوت از مراجع [۴۳]، [۴۰ و ۴۱] و [۳۹]..... ۵۴
- شکل ۴- ۲۰ ساختار تشدیدگر SR با حضور زیرلایه دی‌الکتریک به ضخامت  $h$  [۴۲]..... ۵۵
- شکل ۴- ۲۱ مدل مداری شبه استاتیک ساختار SR با در نظر گرفتن تلفات در هادی و زیرلایه [۴۲]..... ۵۵
- شکل ۴- ۲۲ فرکانس تشدید معادل ساختار SR برحسب تعداد دورهای مارپیچ ( $N$ ) به دست آمده از روش‌های تحلیلی، شبیه سازی و اندازه‌گیری..... ۵۶
- شکل ۴- ۲۳ ساختار تشدیدگر LR با حضور زیرلایه دی‌الکتریک به ضخامت  $h$  [۴۲]..... ۵۷
- شکل ۴- ۲۴ مدل مداری شبه استاتیک ساختار LR با در نظر گرفتن تلفات در هادی و زیرلایه [۴۲]..... ۵۷
- شکل ۴- ۲۵ فرکانس تشدید معادل یک LR برحسب طول شکاف‌ها ( $g$ ) به دست آمده از روش‌های تحلیلی، شبیه سازی عددی و اندازه‌گیری..... [۴۲]..... ۵۹
- شکل ۴- ۲۶ ضریب کیفیت تشدیدگرهای حلقوی شکاف‌دار و مارپیچ برحسب تعداد حلقه‌ها/دورها  $N$ . ضرایب کیفیت نسبت به تشدیدگر حلقوی با  $N=2$  نرمالایز شده اند. [۴۲]..... ۶۱
- شکل ۴- ۲۷ نفوذپذیری مغناطیسی نسبی یک تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار برحسب فرکانس به دست آمده از مدل تحلیلی و استخراج از پارامترهای S [۴۲]..... ۶۲
- شکل ۴- ۲۸ نفوذپذیری مغناطیسی نسبی یک تشدیدگر حلزونی (SR) برحسب فرکانس به دست آمده از مدل تحلیلی و استخراج از پارامترهای S [۴۲]..... ۶۳
- شکل ۵- ۱ شمای سه بعدی از یک سلول واحد SRR با دو بستر دی‌الکتریک در بالا و پایین ساختار (شبیه سازی شده در HFSS)..... ۶۵
- شکل ۵- ۲ خازن مسطح با دولایه دی‌الکتریک در بالا و پایین ساختار..... ۶۷
- شکل ۵- ۳ ساختار SRR از قسمت خط چین معادل دو خازن سری است..... ۶۷
- شکل ۵- ۴ پارامترهای پراکندگی سلول واحد SRR، شبیه سازی شده توسط HFSS..... ۶۹
- شکل ۵- ۵ نمودار فرکانس تشدید برحسب ثابت دی‌الکتریک بستر دوم به دست آمده از مدل تحلیلی و شبیه سازی عددی..... ۷۰

- شکل ۵-۶ نمودار فرکانس تشدید برحسب ضخامت بستر دوم به دست آمده از شبیه سازی توسط نرم افزار HFSS و مدل تحلیلی..... ۷۱
- شکل ۵-۷ پارامتر پراکندگی  $S_{21}$  برای ساختار حسگر شبیه سازی شده در نرم افزار HFSS..... ۷۳
- شکل ۵-۸ نمودار فرکانس تشدید حسگر رطوبت برحسب گذردهی الکتریکی خاک به دست آمده از شبیه سازی و مدل تحلیلی..... ۷۴
- شکل ۵-۹ شمای سه بعدی از یک سلول واحد SRR با دو بستر دی الکتریک در زیر ساختار تشدیدگر (شبیه سازی شده در HFSS)..... ۷۵
- شکل ۵-۱۰ نمودار فرکانس تشدید ساختار حسگر برحسب گذردهی الکتریکی نسبی خاک به دست آمده از شبیه سازی و مدل تحلیلی..... ۷۸
- شکل ۵-۱۱ شمای سه بعدی از یک سلول واحد SR با دو بستر دی الکتریک در بالا و پایین ساختار (شبیه سازی شده در HFSS)..... ۷۹
- شکل ۵-۱۲ معادل کردن طول ساختار SR با چهار طول  $l_1, l_2, l_3$  و  $l_4$ ..... ۸۱
- شکل ۵-۱۳ نمودار فرکانس تشدید برحسب ثابت دی الکتریک بستر دوم به دست آمده از مدل تحلیلی و شبیه سازی عددی..... ۸۳
- شکل ۵-۱۴ نمودار فرکانس تشدید برحسب ضخامت بستر دوم به دست آمده از شبیه سازی توسط نرم افزار HFSS و مدل تحلیلی..... ۸۳

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۹	جدول ۱-۳: اندازه پارامترهای هندسی و فیزیکی داده شده در شکل ۲-۳
۳۰	جدول ۲-۳: اندازه پارامترهای هندسی و فیزیکی سلول واحد QSRR شکل ۱۳-۳
۶۵	جدول ۱-۵: اندازه پارامترهای هندسی و فیزیکی داده شده در شکل ۱-۵
	جدول ۲-۵: مقادیر ضرایب گذردهی الکتریکی و تلفات خاک برحسب ۲ تا ۲۰ درصد
۷۲	رطوبت [۱۸]
۷۷	جدول ۳-۵: اندازه پارامترهای هندسی و فیزیکی داده شده در شکل ۷-۵
۷۹	جدول ۴-۵: اندازه پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختار SR شکل ۱۰-۵

## فصل اول: مقدمه و تاریخچه فرامواد

### ۱-۱ مقدمه

پاسخ مواد به یک موج الکترومغناطیسی تابشی به وسیله پارامترهای الکترومغناطیسی ماکروسکوپیکی چون ثابت گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> و نفوذپذیری مغناطیسی<sup>۲</sup> تعیین می‌گردد. امروزه با پیشرفت در توانایی ساخت مواد مصنوعی، می‌توان موادی ترکیبی ایجاد کرد که با تغییر پارامترهای گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی، پاسخ آن‌ها را به موج‌های الکترومغناطیسی به صورت مطلوب تغییر داد و موادی با خواص الکترومغناطیسی منحصر به فرد که در طبیعت یافت نمی‌شود، ایجاد کرد. این مواد مصنوعی را به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی متفاوت از مواد معمولی فرامواد نامیدند. ویژگی‌های فرامواد بیشتر از آنکه از اجزاء سازنده ناشی شود از شکل ساختاری آن‌ها بدست می‌آید. در این ساختارها با ایجاد ناهمگونی‌های کوچک، رفتار موثر ماکروسکوپیکی بدست می‌آید [۲،۱]. در سال‌های اخیر توجهات به فرامواد به دلیل پتانسیل آن‌ها در خلق افزارهایی با ویژگی‌های خارق‌العاده افزایش یافته است. از آن جمله فرامواد با ضریب شکست منفی<sup>۳</sup> یا همان مواد چپ‌گرد<sup>۴</sup> می‌باشد که بخش عظیمی از مقالات محققین در دهه اخیر را به خود اختصاص داده است.

### ۲-۱ تاریخچه

در سال ۱۹۶۸ وسلایگو<sup>۵</sup>، دانشمند روسی فرضیه‌ای عجیب را ارائه نمود. او مواد چپ‌گردی را مورد بررسی قرار داد که هم‌زمان دارای گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی منفی می‌باشند [۳]، وی نشان داد این ساختار ضریب شکست منفی خواهد داشت، که در نوع خود پدیده‌ای شگفت‌انگیز می‌باشد، چرا که ضریب شکست برای مواد معمولی همواره پارامتری مثبت است و عملاً در طبیعت ماده‌ای با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی منفی نمی‌توان یافت. وی همچنین نشان داد که

---

<sup>۱</sup> Electric Permittivity

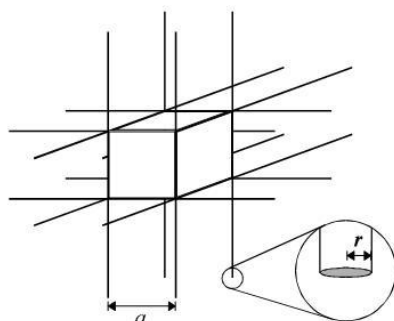
<sup>۲</sup> Magnetic Permeability

<sup>۳</sup> Negative Refractive Index Materials (NRMs)

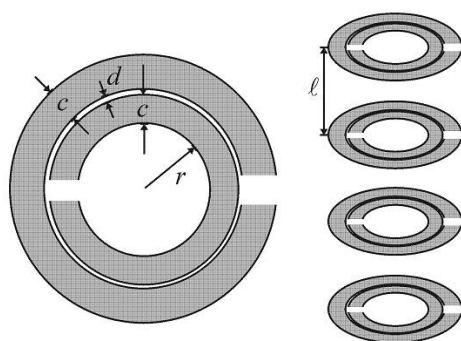
<sup>۴</sup> Left Handed Materials (LHMs)

<sup>۵</sup> Veselago

پدیده‌های فیزیکی در این مواد چپ‌گرد همچون شکست نور، اثر داپلر<sup>۱</sup> و پدیده واویلوف - سرنکوف<sup>۲</sup> به صورت معکوس می‌گردد. البته به دلیل اینکه چنین موادی در طبیعت وجود ندارد، نزدیک به ۳۰ سال به کارهای این دانشمند توجهی نشد، تا اینکه در سال ۱۹۹۶ پندری<sup>۳</sup> توانست ساختاری را شامل آرایه‌ای از سیم‌های فلزی نازک (شکل ۱-۱) ارائه دهد که در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس پلاسما الکتریکی<sup>۴</sup> گذردهی الکتریکی منفی دارند [۵، ۴]. وی سه سال بعد ساختار تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار<sup>۵</sup> از جنس یک رسانای غیر مغناطیسی همچون فلز مس (شکل ۱-۲) را برای نفوذپذیری مغناطیسی منفی ارائه داد [۶].



شکل ۱-۱ آرایه‌ای از سیم‌های فلزی نازک [۴]



شکل ۱-۲ ساختار تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار ساخته شده از یک رسانای غیر مغناطیسی [۶]

<sup>۱</sup> Doppler Effect

<sup>۲</sup> Vavilov-Cerenkov

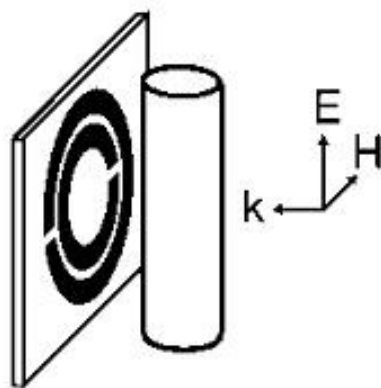
<sup>۳</sup> Pendry

<sup>۴</sup> Electrical Plasma Frequency

<sup>۵</sup> Split Ring Resonator (SRR)



تحقق اولین ماده چپ‌گرد توسط اسمیت<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۰ صورت گرفت. وی دو ساختار پندری یعنی آرایه سیم‌های نازک و تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار را با هم ترکیب کرد و توانست فراماده‌ای ایجاد کند که در یک بازه فرکانسی مشخص هر دو ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی آن منفی باشد (شکل ۱-۳) [۸،۷]. بدین ترتیب فرضیه وسلاگو تحقق پیدا کرد و فراماده‌ای با ویژگی‌های غیر عادی چون ضریب شکست منفی، اثر داپلر معکوس و ... ایجاد شد.



شکل ۱-۳ ساختار اولین ماده چپ‌گرد [۷]

از آنجا که فرامواد پدیده‌های فیزیکی جدیدی را از خود نشان می‌دادند، توجه دانشمندان را به خود جلب نموده و از سال ۲۰۰۰ به بعد مطالعات زیادی چه در زمینه تئوری فرامواد و چه در زمینه عملی صورت گرفت. البته محققین در ساختارهای ارائه شده برای فرامواد با مشکلاتی نیز روبرو بودند، از جمله تلفات بالا و پهنای باند باریک، که این موانع کاربردهای فرامواد را محدود می‌کرد. اما آنان با بهبود ساختارها توانستند بر این مشکلات غلبه کرده و فراماده‌هایی در حوزه فرکانس نوری ارائه دهند [۹].

در ابتدا تحقیقات در زمینه فرامواد بر روی ایجاد ساختارهایی با نفوذپذیری مغناطیسی منفی و یافتن ویژگی‌های منفی بودن ضریب شکست متمرکز بود. اما امروزه این مطالعات بیشتر بر روی بررسی ویژگی‌های انتقال و انتشار امواج در ساختارهای ابداعی و نیز کاربردهای آنها و ورود این نوع مواد

<sup>۱</sup> Smith

مصنوعی به سیستم‌های عملی به منظور غلبه بر محدودیت‌های فیزیکی موجود در آن‌ها، متمایل گردیده است.

از جمله کاربردهای فراوانی که تاکنون برای فرامواد ارائه گردیده، ابر لنزها<sup>۱</sup> که قابلیت تصویربرداری با دقت بالا در ابعاد زیر طول موج را دارند [۱۰]، صفحه موج‌های بسیار فشرده<sup>۲</sup> [۱۱]، ساخت پوششی از جنس فراماده با قابلیت نامرئی سازی اجسام [۱۲]، ایجاد افزارهای جدیدی با ویژگی‌های بسیار ممتاز در حوزه آنتن‌ها [۱۳] و نیز استفاده از فرامواد در ساخت مدولاتورها، فیلترها، جبران کننده‌های فاز و غیره، می‌باشد [۱۴، ۱۵، ۱۶]. همچنین امروزه ساخت حسگرهای مبتنی بر فراماده از جمله کاربردهای مورد توجه محققین است. از انواع این حسگرها می‌توان به حسگرهای فشار، دما و رطوبت اشاره کرد [۱۷، ۱۸، ۱۹].

در فصل اول اشاره‌ای کوتاه به تاریخچه فرامواد شد و روند پیدایش ایده ساختارهایی مصنوعی با ویژگی‌های متمایز از مواد معمول در طبیعت بیان گردید.

در فصل دوم مفاهیم پایه در تحلیل فرامواد را بررسی کرده و ویژگی‌های انتقال امواج الکترومغناطیس در فرامواد را مورد توجه قرار می‌دهیم. سپس ساختارهای با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی منفی را مطالعه خواهیم کرد. همچنین ویژگی جالب ضریب شکست منفی در فرامواد را بیان می‌کنیم.

در فصل سوم به بررسی ساختار تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار که ساختاری متداول در فرامواد به منظور ایجاد نفوذپذیری مغناطیسی منفی می‌باشد پرداخته و نحوه‌ی شبیه سازی این فراماده مغناطیسی در نرم افزار HFSS را بیان می‌کنیم. در ادامه تاثیر پارامترهای این ساختار را بر فرایند تشدید در آن مورد توجه قرار می‌دهیم.

---

<sup>۱</sup> Superlenses

<sup>۲</sup> Ultracompact Waveplates

در فصل چهارم مدل تحلیلی بیلاتی را برای چند فراماده مغناطیسی متداول بررسی می‌کنیم. این مدل‌ها در فهم بهتر و بهبود ویژگی‌های مواد با نفوذپذیری مغناطیسی منفی کمک شایانی کرده و به دلیل سرعت بالای آن در تحلیل ساختارها نسبت به حل شبیه سازی عددی مزیت زیادی دارند.

در فصل پنجم برای اولین بار مدل تحلیلی برای فرامواد مغناطیسی با دو بستر دی‌الکتریک را بررسی می‌کنیم. و صحت آن را برای دو ساختار متداول فراماده مغناطیسی با مقایسه با نتایج شبیه سازی عددی ارزیابی کرده سپس این مدل تحلیلی را برای حسگر رطوبت خاک به عنوان یک نمونه کاربردی از فراماده مغناطیسی با دو بستر دی‌الکتریک به کار می‌گیریم.

## فصل دوم: مفاهیم پایه در فرامواد

### ۱-۲ مقدمه

توسعه ساختارهای فرامواد به منظور تحقق افزارهای جدید با قابلیت‌های الکترومغناطیسی غیرمعمول در کاربردهایی چون تصویرسازی، عدسی‌ها، نامرئی‌سازی، فیبرهای نوری و لیزرها احتیاج به کنترل موثر در انتقال و انتشار موج‌های الکترومغناطیسی دارد. پاسخ الکترومغناطیسی مواد به وسیله پارامترهایی چون گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ )، نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) و ضریب رسانایی ( $\sigma$ ) تعیین می‌گردد. برای یک ماده بدون تلف (یا با اتلاف کم) پارامترهای گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی تعیین کننده پاسخ الکترومغناطیسی آن می‌باشد. گرچه مواد طبیعی اکثراً دارای ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مثبت می‌باشند اما این ضرایب در فرامواد (با ضریب شکست منفی) همزمان علامتی منفی دارند. بدین ترتیب برای ایجاد ساختارهای فرامواد با ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی منفی نیاز به ساخت موادی مصنوعی هستیم. در این فصل به بررسی ویژگی‌های انتقال و انتشار امواج الکترومغناطیسی در فرامواد پرداخته و چگونگی ایجاد ساختارهای مصنوعی با ضریب گذردهی الکتریکی منفی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی را مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

### ۲-۲ ویژگی‌های انتقال در فرامواد

پدیده‌های الکترومغناطیسی ماکروسکوپیکی توسط معادلات ماکسول توضیح داده می‌شوند. در اینجا نیز برای توضیح تئوری فرامواد از معادلات ماکسول شروع می‌کنیم. میدان‌های الکترومغناطیسی در هر نقطه از فضا توسط معادلات ماکسول بیان می‌شوند، که در حوزه زمان به شکل زیر می‌باشند:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (3-2)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4-2)$$