



Design and fabrication of a Patch-Microstrip Antenna with a Miniaturization Factor of 3.2 using Metamaterial Formation Based on Spiral Fractals in the Substrate

Masoud Edalatipour¹, Morteza Ghomshi^{2*}

1. Faculty member, Ferdowsi University of Mashhad

2. M.Sc. Electrical Engineering – Communications

Key words:

*Circular Spiral
Metamaterial
Miniaturization
Fractal*

Abstract

In this article a miniature patch antenna is recommended and its radiation features are analyzed experimentally. In this structure, a new metamaterial fractal configuration is used based on circular spiral elements as the antenna substrate. Not only the recommended antenna has a lighter structure in comparison to the previous samples, but also it provides a better gain. By using the mentioned scheme, a reduction factor of 3.2 is achieved. This smallness in dimension shows the importance of using this scheme in practices with weight and dimension limit.

* Corresponding author's E-mail: mortezaghomeshi@gmail.com



طراحی و ساخت آنتن پچ مایکرواستریپ با ضریب کوچک‌سازی ۳/۲ با استفاده از

ماتامتریال فراکتالی مبتنی بر مارپیچ‌های دایروی در زیرلایه

مسعود عدالتی پور^۱، مرتضی قمشی^{۲*}

۱. عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

۲. کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

چکیده

در این مقاله یک آنتن پچ مایکرواستریپ مینیاتوری مبتنی بر زیرلایه ماتامتریالی فراکتالی پیشنهاد شده است. سلول واحد ماتامتریال از مارپیچ دایروی با ساختار فراکتالی تشکیل شده است و آرایه‌ای از این سلول‌ها به عنوان زیرلایه مغناطیسی مصنوعی آنتن به کار رفته است. در این مقاله با تمرکز بر نوآوری هندسه پیشنهادی، مقایسه آن با هندسه‌های هیلبرت، CSRR، SRR، مارپیچی و Mushroom/EBG صورت گرفته است. آنتن پیشنهادی در حوالی ۵۹۰ MHz کار می‌کند، طول آن ۸ cm بوده و ضریب کوچک‌سازی برابر ۳/۲ دارد. همچنین بهره اندازه‌گیری شده ۲/۲ dB- و پهنای باند نسبی آن ۱/۷٪ است. مزیت این طرح در ترکیب هم‌زمان قابلیت افزایش طول الکتریکی، فشردگی هندسی، ساختار کاملاً صفحه‌ای و امکان ایجاد زیرلایه‌ای با گذردهی الکتریکی و مغناطیسی مؤثر نسبتاً متعادل است که منجر به طراحی آنتنی کوچک و سبک شده است.

واژگان کلیدی

آنتن پچ
کوچک‌سازی
ماتامتریال
مارپیچ دایروی
فراکتال
زیرلایه مغناطیسی
مصنوعی
گذردهی مؤثر

۱- مقدمه

معمولاً برای محقق کردن ویژگی‌های الکترومغناطیسی غیرعادی که در طبیعت به راحتی حاصل نمی‌شود از ماتامتریال استفاده می‌شود. در واقع ماتامتریال‌ها ساختارهای مصنوعی مهندسی شده‌ای هستند که پاسخ الکترومغناطیسی آن‌ها بیش از آنکه به ترکیب شیمیایی ماده وابسته باشد، به هندسه و آرایش سلول‌های زیرطول موجی آن وابسته است [۱]. در آنتن‌ها از ماتامتریال عمدتاً به منظور کوچک‌سازی با حفظ مشخصات تشعشعی و یا بهبود مشخصات تشعشعی بدون افزایش ابعاد آنتن استفاده می‌شود [۲]. در آنتن‌ها، ماتامتریال می‌تواند به عنوان بخشی از ساختار تشعشعی، بارگذاری شده روی زمین، یا به عنوان محیط زیرلایه به کار رود و از طریق تغییر شرایط میدان نزدیک، کنترل پراکندگی و ایجاد پاسخ تشدید، به کوچک‌سازی یا بهبود بهره و پهنای باند کمک کند. در مقاله Dong و Itoh [۲]، ماتامتریال‌های استفاده شده به منظور کوچک‌سازی آنتن‌ها را به چهار خانواده اصلی شامل آنتن‌های رزونانسی مبتنی بر مهندسی منحنی dispersion، آنتن‌های مبتنی بر ماتامتریال‌های با ضریب گذردهی منفی الکتریکی و مغناطیسی، آنتن‌های مبتنی بر متارزوناتورهای SRR/CSRR و در نهایت آنتن‌های بارگذاری شده

با متاسطوح مانند ساختارهای EBG Mushroom دسته‌بندی می‌کند. این دسته‌بندی نشان می‌دهد که ماتامتریال یک هندسه واحد نیست، بلکه مجموعه‌ای از سازوکارهای متفاوت برای کنترل امواج است [۳-۴].

برای آنتن پچ، اندازه مؤثر تشعشعی تابع طول موج هدایت شده ($L = \lambda_g/2$) و در نتیجه تابع خواص الکترومغناطیسی محیط زیرلایه است ($\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\mu_{eff}\epsilon_{eff}}$). در مقاله حاضر، ایده اصلی افزایش هم‌زمان گذردهی الکتریکی و مغناطیسی مؤثر است؛ زیرا تغییر نامتوازن یکی از این دو پارامتر

می‌تواند امپدانس موج را ($\eta = \sqrt{\mu_{eff}/\epsilon_{eff}}$) از مقدار مطلوب دور کند. بنابراین هدف فقط افزایش ϵ_{eff} یا μ_{eff} نیست، بلکه دستیابی به محیطی با پاسخ مؤثر مناسب و امکان حفظ تطبیق امپدانس است. این منطق با ادبیات ماتامتریال‌های آنتنی، که بر مهندسی هم‌زمان پاسخ الکتریکی/مغناطیسی و شرایط میدان نزدیک برای کوچک‌سازی تأکید دارد، سازگار است [۳-۴].

در کارهای کلاسیک، منحنی هیلبرت برای ایجاد مسیر الکتریکی طولانی در سطحی فشرده به کار رفته است و در مقاله [۵] یک آنتن کوچک‌شده با inclusions هیلبرت گزارش شده است. با این حال، ساختار هیلبرت دارای گوشه‌ها و شکست‌های متوالی است و پاسخ آن به جزئیات هندسی و جهت

خودتشابهی بهره نبرند.	LC با توزیع شده		
نیازمند آرایه سلول و معمولاً via سازوکار اصلی کنترل سطح/بازتاب است نه الزاماً محیط همگن $\epsilon_{eff}-\mu_{eff}$.	افزایش بهره، پهنای باند و کاهش تشعشع عقب	HIS، بازتاب هم فاز و سرکوب موج سطحی	Mushroom/EBG
ساخت یک زیرلایه مؤثر با پاسخ الکتریکی و مغناطیسی متعادل	ترکیب فشرده‌گی، ساختار صفحه‌ای، مسیر الکتریکی طولانی و امکان افزایش هم زمان μ_{eff} و ϵ_{eff}	LC تشدید، مسیر فشرده چندمقیاسی، زیرلایه مؤثر	مارپیچ دایروی فراکتالی پیشنهادی

در هندسه‌های مارپیچی نیز افزایش طول الکتریکی در فضای محدود یک مزیت شناخته شده است. مقاله [۳] نمونه‌ای از بارگذاری هم زمان spiral ring resonator و Hilbert line را برای افزایش پهنای باند یک آنتن پچ ذکر می‌کند و برای آن بهبود ۲۰۷ درصدی پهنای باند در ۳/۵ GHz گزارش شده است. در نتیجه، مزیت مورد انتظار مارپیچ دایروی فراکتالی در این مقاله، دستیابی به مسیر الکتریکی طولانی با ساختار پیوسته و قابل ساخت، در کنار امکان ایجاد پاسخ مؤثر الکتریکی و مغناطیسی مناسب برای استفاده به عنوان زیرلایه است [۳، ۱۲]. مقایسه کیفی بین آنتن پیشنهادی و ساختارهای موجود در مراجع در جدول ۱ آمده است.

این مقایسه با توجه به تفاوت سازوکارهاست و نباید اعداد عملکردی حاصل از فرکانس‌ها، زیرلایه‌ها و معیارهای متفاوت مستقیماً با یکدیگر مقایسه شوند. مقالات اخیر تأکید می‌کنند که بارگذاری متامتریال می‌تواند پهنای باند و اندازه را بهبود دهد، اما در برخی طرح‌ها پیچیدگی و حجم ساختار افزایش می‌یابد [۳، ۴، ۹].

۲- ویژگی‌های متامتریال پیشنهادی

سلول واحد پیشنهادی دارای هندسه مارپیچ دایروی چنددوره‌ای است که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی سلول واحد از شرایط مرزی PEC و PMC در ساختار موجبر استفاده شده و ضرایب پراکندگی انتقال و بازتاب برای استخراج پارامترهای مؤثر به روش مبتنی بر S پارامترها محاسبه شده‌اند. روش استخراج ϵ_{eff} و μ_{eff} از ضرایب بازتاب و انتقال، یک روش شناخته شده در مشخصه‌یابی متامتریال است [۱۵-۱۳]. مقادیر حقیقی و موهومی این پارامترها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

میدان می‌تواند حساس باشد. در مقابل، مارپیچ دایروی پیشنهادی از مسیر پیوسته و انحنای نرم استفاده می‌کند و در چند مقیاس هندسی، طول مسیر جریان را در یک ناحیه محدود افزایش می‌دهد. بنابراین نوآوری مقاله حاضر را باید در ترکیب مارپیچ دایروی و ساختار فراکتالی برای ساخت یک زیرلایه مؤثر با پاسخ الکتریکی و مغناطیسی متعادل دانست، نه صرفاً معرفی یک مارپیچ جدید [۵].

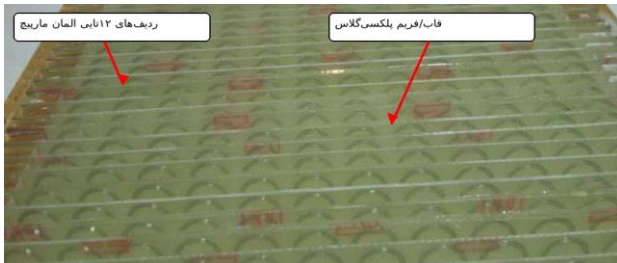
SRR یک متارزوناتور مغناطیسی و CSRR ساختار مکمل آن است که معمولاً رفتار الکتریکی و ویژگی‌های band-stop را نشان می‌دهد؛ این دو ساختار برای کوچک‌سازی ادوات و آنتن‌ها بسیار استفاده شده‌اند [۲]. در مقاله [۶]، بارگذاری CSRR در زمین به صورت DGS همراه با فراکتال Minkowski باعث کاهش ۵۶ درصدی اندازه، افزایش ۲۰۷ درصدی پهنای باند و رسیدن به بهره ۴/۴۶ dB و بازده ۸۹/۳٪ شده است. این نتایج نشان می‌دهد CSRR برای افزایش پهنای باند و کوچک‌سازی بسیار قدرتمند است، اما سازوکار آن با زیرلایه متامتریالی مقاله حاضر یکسان نیست؛ CSRR در زمین قرار گرفته و یک نقص تشدید ایجاد می‌کند، در حالی که ساختار پیشنهادی ما به صورت یک زیرلایه متامتریالی مستقل بین پچ و زمین عمل می‌کند [۸-۷].

ساختارهای Mushroom/EBG نیز رویکرد متفاوتی دارند. این ساختارها با ایجاد سطح با امپدانس بالا، انتشار امواج سطحی را سرکوب کرده و بازتاب هم فاز ایجاد می‌کنند؛ در نتیجه می‌توانند بهره، پهنای باند و نسبت تشعشع رو به جلو را بهبود دهند [۹، ۵]. با این حال، Mushroom معمولاً به آرایه‌ای از patch های فلزی و vias نیاز دارد و هدف اصلی آن کنترل امواج سطحی و شرایط مرزی/بازتابی است، نه الزاماً استخراج یک محیط همگن با ϵ_{eff} و μ_{eff} بزرگ و نسبتاً متعادل [۱۱، ۱۰].

جدول (۱): مقایسه کیفی هندسه‌های متامتریالی مرتبط با کوچک‌سازی آنتن.

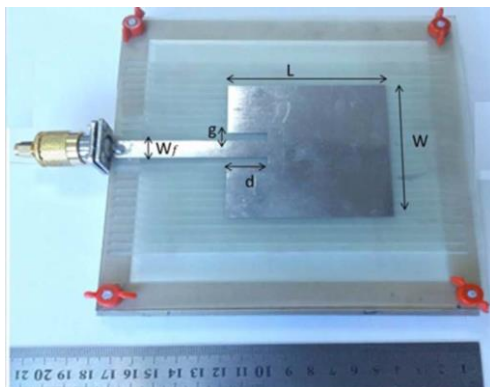
هندسه	سازوکار اصلی	مزیت شاخص	محدودیت/تفاوت با طرح حاضر
Hilbert	افزایش طول مسیر جریان در سطح فشرده	فشرده‌سازی هندسی و افزایش طول الکتریکی	گوشه‌های متعدد و حساسیت بیشتر به پارامترهای هندسی
SRR	رزونانس مغناطیسی LC	کوچک‌سازی و امکان تحریک مغناطیسی	اغلب به کوپلینگ/نحوه تغذیه مناسب نیاز دارد و ذاتاً با زیرلایه ϵ/μ متعادل مقاله حاضر یکسان نیست.
CSRR	رزونانس مکمل با رفتار الکتریکی و DGS	کوچک‌سازی و افزایش پهنای باند؛ قابلیت فیلتر/ردباند	بیشتر به صورت شیار در زمین عمل می‌کند؛ هدف آن با استخراج زیرلایه مؤثر مقاله حاضر متفاوت است.
Spiral	افزایش طول مسیر الکتریکی	هندسه فشرده و افزایش طول الکتریکی	نمونه‌های غیر فراکتالی ممکن است از مزیت چندمقیاسی

آنتن پیشنهادی برای عملکرد در حوالی فرکانس ۵۶۰ MHz طراحی شده است. برای کاهش هزینه محاسباتی، ابتدا محیط معادل بر اساس پارامترهای استخراج شده تعریف و سپس با شبیه سازی تمام موج به روش FEM در HFSS صحت مدل بررسی و ابعاد بهینه تعیین شده است. در ساخت نمونه، ۱۲ المان مارپیچ روی لایه FR۴ با ضخامت ۰/۸ mm چاپ شده تا یک ردیف سلول تشکیل شود؛ ردیف ها در قاب پلکسی گلاس قرار گرفته و مجموعه ای ۲۴ ردیفی زیرلایه نهایی را تشکیل داده است. این ساختار در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل (۳): نمونه ساخته شده زیرلایه متامتریالی؛ اجزای اصلی شامل ردیف های سلول مارپیچی، لایه های FR۴ و قاب پلکسی گلاس در شکل مشخص شده اند.

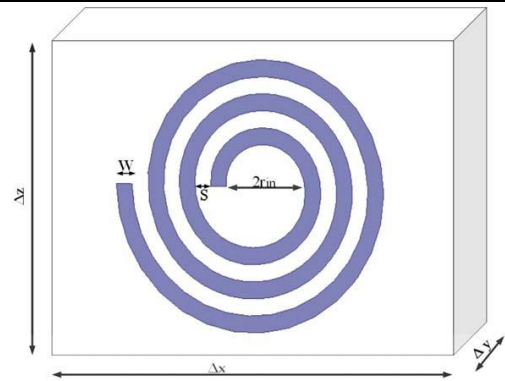
سپس پچ روی یک لایه FR۴ بسیار نازک قرار گرفته و زیرلایه متامتریال بین پچ و صفحه زمین آلومینیومی واقع شده است. ساختار نهایی در شکل ۴ نمایش داده شده است. طبق نمونه ساخته شده، طول آنتن ۸ cm است و نسبت به آنتن مشابه با زیرلایه هوا در حوالی ۵۹۰ MHz، ضریب کوچک سازی ۳/۲ به دست آمده است.



شکل (۴): ساختار آنتن پچ ساخته شده و قرارگیری زیرلایه متامتریال بین پچ و زمین.

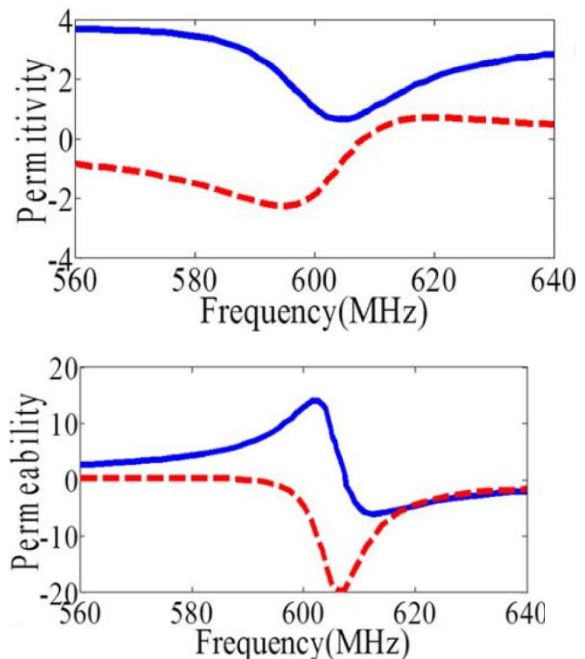
۴- نتایج شبیه سازی و اندازه گیری

نتایج اندازه گیری و شبیه سازی مربوط به مشخصه امپدانس آنتن مورد نظر در شکل ۵ نمایش داده شده است.



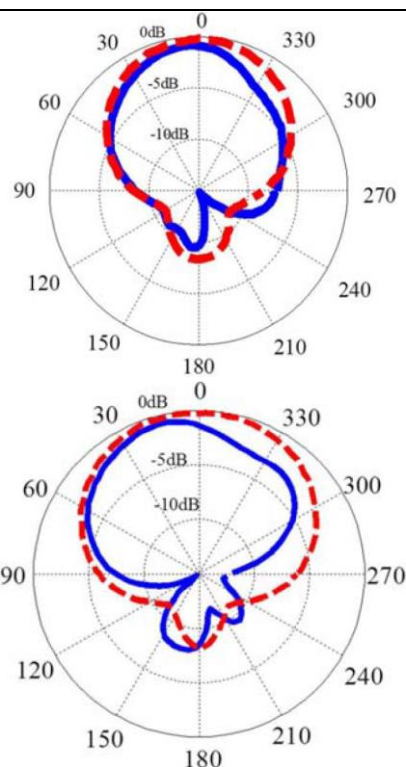
شکل (۱): سلول واحد متامتریال فراکتالی مبتنی بر مارپیچ دایروی.

نتایج استخراج شده نشان می دهند که در بازه فرکانسی ۵۶۰ MHz تا ۵۹۰ MHz، هر دو پارامتر ϵ_{eff} و μ_{eff} دارای مقادیر حقیقی قابل توجهی هستند. که برای کاربرد زیرلایه در جهت کوچک سازی آنتن استفاده شده است.



شکل (۲): ضریب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر مدل زیر لایه آنتن پیشنهادی. قسمت موهومی با رنگ قرمز و قسمت حقیقی با رنگ آبی از دیدگاه فیزیکی، ساختار مارپیچی به واسطه طول مسیر جریان و فاصله های باریک میان بخش های فلزی، اندوکتانس و ظرفیت توزیع شده قابل توجهی ایجاد می کند. خودتشابهی فراکتالی نیز امکان افزایش طول مسیر مؤثر بدون افزایش متناسب ابعاد خارجی را فراهم می سازد. این ویژگی با اصل space-filling در آنتن های فراکتالی سازگار است؛ در ادبیات فراکتال، خودتشابهی بیشتر برای چندبند سازی و space-filling برای کاهش ابعاد مورد استفاده قرار می گیرد [۱۸-۱۶، ۶].

۳- طراحی آنتن پچ مبتنی بر متامتریال



شکل (۶): الگوی تشعشعی نرمالیزه حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری، نمودار بالا صفحه E و نمودار پایین صفحه H

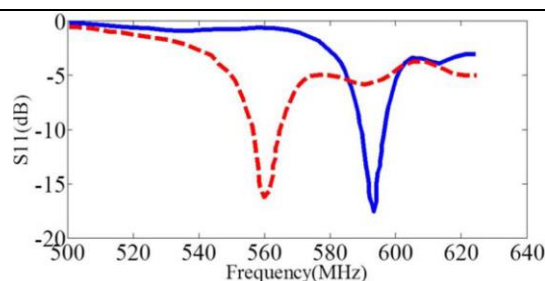
مقایسه نتایج آنتن پیشنهادی با موارد موجود در مراجع در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): مقایسه آنتن پیشنهادی با نمونه های موجود در مراجع

مرجع	ساختار	فرکانس	ابعاد/کاهش اندازه	BW	Gain
این کار	مارپیچ دایروی فراکتالی به عنوان زیرلایه	≈ 590 MHz	۸ cm؛ ضریب کوچک سازی ۳/۲	۱/۷%	-۲/۲ dB
Mookiah & Dandekar (۲۰۰۹) [۶]	متامتریال زیرلایه پچ/آرایه	۲۵۰ MHz	ضریب کوچک سازی ۶/۴۵	۱%	-۳/۹ dB
Yousefi & Ramahi (۲۰۱۰) [۷]	زیرلایه با inclusions هیلبرت	۶۱۵ MHz	ضریب کوچک سازی ۵/۳	۲/۱%	-۳/۴ dB

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک آنتن پچ مینیاتوری با زیرلایه متامتریالی فراکتالی مبتنی بر مارپیچ دایروی بررسی شد. هندسه پیشنهادی در مقایسه با Hilbert، CSRR، SRR و Mushroom از نظر سازوکار عملکردی تفکیک شد و روشن شد که نمی توان برتری مطلق هیچ هندسه ای را بدون مقایسه در شرایط یکسان ادعا کرد. مزیت مشخص ساختار پیشنهادی در این مقاله، ترکیب مسیر الکتریکی طولانی، فشردگی فضایی، ساختار صفحه ای و امکان ایجاد



شکل (۵): مقایسه پارامتر S_{11} آنتن ساخته شده (رنگ آبی توپر نتیجه ساخت) و شبیه سازی شده (رنگ قرمز خط چین نتیجه حاصل از شبیه سازی).

همانطور که از نتایج مشخص است، بین پاسخ شبیه سازی و اندازه گیری S_{11} جابه جایی فرکانسی حدود ۱۵ MHz مشاهده شده است. محتمل ترین عامل این تفاوت، یک خطای سیستماتیک مدل سازی ناشی از همگن سازی محیط و تفاوت آن با آرایه محدود واقعی است. در محیط واقعی، کوپلینگ بین سلول ها، اثر لبه های آرایه، فاصله واقعی بین پچ و سلول ها، ناهمگنی فضایی μ_{eff} و ϵ_{eff} ، و پراکندگی فرکانسی پارامترهای مؤثر وجود دارد؛ در حالی که مدل معادل این جزئیات را به صورت کامل بازتولید نمی کند [۹، ۱۳].

در کنار آن، عوامل ساخت و اندازه گیری نیز می توانند سهم داشته باشند؛ از جمله تolerانس ابعادی چاپ و برش، ضخامت واقعی $FR4$ و پلکسی گلاس، مقدار واقعی ϵ_r و $\tan\delta$ ، ضخامت و زبری فلز، هم راستایی لایه ها، کیفیت اتصال تغذیه و اثر کانکتور. در یک نمونه مستقل از آنتن Mushroom نیز اختلاف اندازه گیری و شبیه سازی به تolerانس ساخت و تلفات دی الکتریک نسبت داده شده است [۴]. بنابراین، با توجه به اینکه اختلاف ۱۵ MHz به شکل یک جابه جایی منظم کل پاسخ دیده می شود، در این مقاله آن را عمدتاً یک اختلاف سیستماتیک ناشی از مدل معادل توأم با اثرات ساخت در نظر می گیریم، نه یک خطای تصادفی صرف [۴، ۱۰، ۱۱].

برای کاهش این اختلاف در کار آینده، پیشنهاد می شود آرایه واقعی ۲۴ ردیفی مستقیماً در HFSS مدل شود، ϵ_r و $\tan\delta$ واقعی مواد با اندازه گیری مستقل تعیین شوند و عدم قطعیت ابعادی ساخت در یک sweep پارامتری وارد شبیه سازی شود. این روش امکان تفکیک سهم مدل، ساخت و اندازه گیری را فراهم می کند.

در شکل ۶ نتایج اندازه گیری و شبیه سازی پترن صفحه E و H به ترتیب نشان داده شده است. بهره اندازه گیری شده آنتن برابر -۲/۲ dB حاصل شده است که بهبود قابل توجهی نسبت به مراجع را نشان می دهد. علت اختلاف بین مقادیر شبیه سازی و ساخت نیز مانند اختلاف مشخصات امپدانسی ناشی از خطای مدل سازی و دقت ساخت می باشد.

- metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63, 2306–2311.
- [13] Smith, D.R.; Schultz, S.; Markos, P.; Soukoulis, C.M. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients *Physical review B* & 2002 & 65(19), 195104.
- [14] Murugan, S. Compact MIMO shorted microstrip antenna for 5G applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2021, 11(1), 22–27. DOI: 10.5815/ijwmt.2021.01.03.
- [15] Mitra, D.; Ghosh, B.; Sarkhel, A. A miniaturized ring slot antenna design with enhanced radiation characteristics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1), 300–306. DOI: 10.1109/TAP.2015.2496628.
- [16] Cao, T.N.; Krzysztofik, W.J. Hybrid Minkowski Fractal Island Antenna Operating in Two Bands of GPS Satellite System. 2016 *IEEE APS & USNC-URSI*, 2016, 211–212.
- [17] Parmar, S.R.S.; Singh, E.H. Analysis of fractal geometries and its applications in microstrip antenna. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2017, 8(4), 194–198. DOI: 10.26483/ijarcs.v8i4.3731.
- [18] Mookiah, P.; Dandekar, K.R. Metamaterial-substrate antenna array for MIMO communication system. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10), 3283–3292.
- [19] Yousefi, L.; Boybay, M.S.; Ramahi, O.M. Characterization of metamaterials using a strip line fixture. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(4), 1245–1253.
- transmission coefficients. *Physical Review B*, 2002, 65, 195104.
- پاسخ مؤثر الکتریکی و مغناطیسی مناسب برای زیرلایه است. اختلاف ۱۵ MHz بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، سهم اصلی مدل محیط معادل، اثر آرایه محدود و عوامل ساخت/اندازه‌گیری تشریح گردید. نمونه ساخته‌شده دارای طول ۸ cm، ضریب کوچک‌سازی ۳/۲، فرکانس کاری حوالی ۵۹۰ MHz، پهنای باند نسبی ۱/۷٪ و بهره اندازه‌گیری‌شده ۲/۲ dB– است. در نهایت، مقایسه با مقالات اخیر نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر هدف و معماری با CSRR/DGS و Mushroom/EBG متفاوت است و برای قضاوت دقیق‌تر درباره برتری آن باید در یک فرکانس، زیرلایه، حجم، روش تغذیه و معیار عملکرد یکسان انجام شود.
- ## مراجع
- [1] Smith, D. R, Padilla, W. J. Vier, D. C, Nemat-Nasser S. C., and S. Schultz, Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters* & 2000, 84(18), 4184
- [2] Dong, Y.; Itoh, T. Metamaterial-Based Antennas. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(7), 2271–2285. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2187631.
- [3] Hussain, M.; Awan, W.A.; Alzaidi, M.S.; Hussain, N.; Ali, E.M.; Falcone, F. Metamaterials and Their Application in the Performance Enhancement of Reconfigurable Antennas: A Review. *Micromachines*, 2023, 14, 349. DOI: 10.3390/mi14020349.
- [4] Alibakhshikenari, M.; Virdee, B.S.; Azpilicueta, L.; et al. A comprehensive survey of metamaterial transmission-line based antennas: Design, challenges, and applications. *IEEE Access*, 2020, 8, 144778–144808.
- [5] Yousefi, L.; Ramahi, O.M. Miniaturized antennas using artificial magnetic materials with fractal Hilbert inclusions. *Electronics Letters*, 2010, 46(12), 816–817.
- [6] Cao, T.N.; Nguyen, T.Q.H.; Nguyen, T.N.; Nguyen, N.H.; Le, D.T. Improved performance for antenna based on a combination of fractal geometry with CSRR. *Journal of Information and Telecommunication*, 2023, 7(2), 144–154. DOI: 10.1080/24751839.2023.2174646.
- [7] Phan, D.T.; Phan, H.L.; Nguyen, T.Q.H. A miniaturization of microstrip antenna using negative permittivity metamaterial based on CSRR loaded ground for WLAN applications. *Journal of Science and Technology*, 2016, 54(6), 689–697. DOI: 10.15625/0866-708X/54/6/8375.
- [8] Raval, F.; Kosta, Y.P.; Joshi, H. Reduced size patch antenna using complementary split ring resonator as defected ground plane. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(8), 1126–1133. DOI: 10.1016/j.aeue.2015.04.013.
- [9] Lima, A.M.; Cunha, N.H.O.; da Silva, J.P. Effect of metamaterial cells array on a microstrip patch antenna design. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2020, 19, 327–342.
- [10] Alibakhshikenari, M.; Khalily, M.; Virdee, B.S.; See, C.H.; Abd-Alhameed, R.A.; Limiti, E. Mutual coupling suppression between two closely placed microstrip patches using EM-bandgap metamaterial fractal loading. *IEEE Access*, 2019, 7, 23606–23614.
- [11] Alibakhshikenari, M.; Khalily, M.; Virdee, B.S.; See, C.H.; Abd-Alhameed, R.A.; Limiti, E. Mutual-coupling isolation using embedded metamaterial EM bandgap decoupling slab for densely packed array antennas. *IEEE Access*, 2019, 7, 51827–51840.
- [12] Cai, T.; Wang, G.-M.; Zhang, X.-F.; Wang, Y.-W.; Zong, B.-F.; Xu, H.-X. Compact microstrip antenna with enhanced bandwidth by loading magneto-electro-dielectric planar waveguided