

طراحی آنتن شکافی بانده وسیع با الگوی تشعشعی یک طرفه با استفاده از سطوح امپدانس بالا و لایه فریت

رباب کاظمی^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - r.kazemi@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک آنتن شکافی چندلایه جدید با الگوی تشعشعی یک طرفه که با خط میکرواستریپ تغذیه می شود و از یک بازوی دوشاخه^۱ برای تنظیم فرکانسی بهره می برد، ارائه شده است. آنتن شکافی پهن در یک ساختار چندلایه شامل سطح امپدانس بالا (HIS)^۲، لایه های دی الکتریک ضخیم، لایه فریت و صفحه زمین فلزی قرار گرفته است. لایه امپدانس بالای راکتیو برای دستیابی به عملکرد فراباند (UWB) اضافه شده و لایه فریت از تشعشع امواج به پشت آنتن و ایجاد گلبرگ های عقبی^۴ جلوگیری می کند. مطالعات پارامتری برای نشان دادن اثر ابعاد مختلف ساختار روی عملکرد آنتن انجام شده است. آنتن دارای ابعاد نسبتاً کوچک در راستای x و y (10cm×10cm) و پهنای بانده امپدانس بسیار خوبی است که توسط نوع ساختار و لایه های فریت و HIS به دست آمده است. نتایج اندازه گیری نمونه آنتن ساخته شده مطابقت خوبی با نتایج شبیه سازی دارد و بهره مثبت حداقل ۱ dB در جهت عرضی^۵ در پهنای بانده فرکانسی وسیع ۱ : ۴ (۱ GHz - ۴ GHz) با $V_{SWR} < 2$ را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: آنتن شکافی پهن^۶، سطح امپدانس بالا (HIS)، آنتن فراباند، آنتن چندلایه.

Design of a Wideband Slot Antenna with Unidirectional Radiation Pattern Using a High Impedance Surface and a Ferrite Layer

R. Kazemi¹, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: r.kazemi@tabrizu.ac.ir

Abstract: In this paper, we present a novel uni-directional microstrip-fed multi-layer wide tapered slot antenna with a fork-shaped tuning stub. The antenna is embedded in a multi-layer structure backed by a reactive high impedance surface (HIS) and a thick dielectric layer, and then is placed on top of a ferrite tile with a metal ground plane. The HIS layer is added for achieving ultra wideband operation, while the ferrite tile prevents back radiation. A parametric study is presented to show the effect of the various antenna dimensions on the antenna performance. The dimensions of the antenna are small enough along the x and y directions (10cm×10cm), and has ultra wide impedance bandwidth gained by the structure, ferrite and HIS layer. A prototype antenna was fabricated and measured. The measured and simulated results are in good agreement and show a positive broadside gain (>1 dB) over a 4:1 operating band (1 GHz-4 GHz) with a $V_{SWR} < 2$.

Keywords: Wide slot antenna, high impedance surface (HIS), ultra wide band antenna, multi-layer antenna.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۲ و ۱۳۹۶/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۳

نام نویسنده مسئول: رباب کاظمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

آنتن شکافی پهن که با خط میکرواستریپ تغذیه می‌شود، به دلیل عملکرد باند وسیع، هزینه ساخت پایین، ساختار ساده و اندازه کوچک، تحقیقات بسیاری را در طول زمان به خود اختصاص داده است. در [۱] یک آنتن ریزنواری^۷ چندلایه در باند X معرفی شده که با استفاده از یک لایه سوپراستریپ باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG)^۸ پهنای باند را به ۱۳/۳٪ و دایرکتیویته را به ۱۴ dBi افزایش داده است. اما آنتن‌های شکافی نسبت به آنتن‌های ریزنواری دارای پهنای باند امیدانسی وسیعی هستند. به عنوان مثال، در [۲] پهنای باند بیش از ۲۵٪، یعنی ۵ برابر پهنای باند آنتن ریزنواری به دست آمده است. برای افزایش بیشتر پهنای باند، در [۳] انواع مختلف شکاف مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که با بهینه‌سازی شکل شکاف بیش از ۵۵٪ پهنای باند می‌تواند به دست آید. در [۴] یک آنتن چهارشکافی برای دستیابی به پلاریزاسیون دایروی در گیرنده GPS طراحی شده است. این آنتن دارای اندازه بزرگ و ساختار سه‌بعدی است و برای ساختارهای مسطح گزینه مناسبی نیست. در [۵] با افزودن شکاف‌های کوچک به شکاف بزرگ دایروی، بیش از ۱۰۰٪ پهنای باند به دست آمده است. علاوه بر آن، در [۶] پهنای باند شکاف مستطیلی با استفاده از یک خط میکرواستریپ و یک بازوی تنظیم‌کننده دوشاخه افزایش یافته و به ۱۰ برابر پهنای باند آنتن ریزنواری رسیده است. در کنار این روش‌ها، در ساختار جدید، با شکل دادن شکاف و استفاده از خط میکرواستریپ و بازوی دوشاخه پهنای باند افزایش یافته است.

با این وجود، آنتن شکافی الگوی تشعشعی دوطرفه دارد و اندازه گلبرگ اصلی و عقب آن تقریباً یکسان است. معمولاً برای حذف گلبرگ عقبی، یا در پشت آنتن از یک صفحه فلزی به عنوان رفلکتور استفاده می‌شود یا آنتن را در داخل یک حفره^۹ قرار می‌دهند؛ راه دیگر قرار دادن دیواره مغناطیسی معادل در پشت آنتن و یا استفاده از سطوح متنا^{۱۰} است [۷]. برای معادل‌سازی دیواره مغناطیسی، در [۸] از ترکیب یک ساختار باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG) به همراه صفحه زمین فریتی استفاده شد که منجر به کاهش سطح گلبرگ عقبی، افزایش بهره و پهنای باند بسیار وسیع شد. آنتن شکافی حاصل، الگوی تشعشعی یک‌جهته با پهنای باند ۱:۲۲ دارد که از ۱۷۰ MHz شروع می‌شود. فریت به عنوان جاذب در فرکانس‌های پایین و ساختار EBG به عنوان معکوس‌کننده هم‌فاز کامل در فرکانس‌های بالا عمل می‌کند. اما در این آنتن ساختار EBG پیچیده است، چون نیاز به میله‌های قارچی-شکل^{۱۱} دارد و همچنین بهره آن پایین و هزینه ساخت و وزنش بالاست. به جای آن، در [۹] یک طرح سه‌بعدی فرامواد^{۱۲} باند پهن بر اساس الگوریتم ژنتیک برای رفع اشکالات آنتن شکافی دارای فریت و EBG استفاده شد. در این آنتن آرایه‌های صفحه‌ای چندلایه فلزی متناوب زمانی که روی زیرلایه زمین‌شده قرار گیرند، مانند سطوح هادی مغناطیسی مصنوعی (AMC)^{۱۳} رفتار می‌کنند. در این سطوح فاز انعکاس با فرکانس تغییر خواهد کرد و در باند فرکانسی خاصی مقدار آن صفر می‌شود. قطعاً، برای

مدل‌سازی AMC، آرایه‌های یک‌لایه بدون میله^{۱۴} یا حتی ساختارهای چندلایه از این نوع آرایه‌های بدون میله به‌خاطر سهولت ساخت به ساختارهای دیگر مثل AMC‌های قارچی شکل که در [۱۰] و [۱۱] استفاده شده است، ترجیح داده می‌شوند.

اصولاً AMC برای دستیابی به یک سطح امیدانس بالای رآکتیو (HIS) طراحی می‌شود که این کار را با جلوگیری از انتشار جریان‌های سطحی که در هادی‌های فلزی رخ می‌دهد، انجام می‌دهد. سطوح HIS با میله مانع از انتشار امواج سطحی شده و در نتیجه عملکرد آنتن را بهبود می‌دهد؛ از جمله کنترل دقیق الگوی تشعشعی نسبت به آنتن مشابه با صفحه زمین محدود، الگوی تشعشعی یکنواخت، افزایش بهره به مقدار ۰/۵dB تا ۱dB و کاهش سطح گلبرگ عقبی به میزان ۱۰dB تا ۱۵dB [۱۲]. در ساختار AMC پیشنهادی، از یک سطح امیدانس بالا و یک لایه فریت در زیر آن (بدون افزودن میله‌های فلزی) برای سهولت ساخت استفاده شده است. همچنین ساختار جدید، عملکرد انعکاس صفر و پهنای باند وسیع دارد. اما اگر فریت خیلی نزدیک به عنصر تشعشعی قرار گیرد، بهره آنتن را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد؛ لذا یک فاصله هوایی یا یک صفحه دی‌الکتریک بین فریت و عنصر تشعشعی برای کاهش میزان تخریب بهره قرار داده می‌شود.

در اینجا، یک ساختار ترکیبی برای دستیابی به پهنای باند وسیع، ساختار ساده و اندازه نسبتاً کوچک آنتن ارائه شده است. آنتن شکافی پهن و باریک‌شونده^{۱۵} با تغذیه میکرواستریپ و بازوی دوشاخه برای تنظیم^{۱۶} فرکانسی ارائه شده است. المان تشعشعی روی ترکیبی از لایه‌های AMC و فریت به‌همراه صفحه زمین که به‌عنوان یک سطح امیدانس بالا (HIS) عمل می‌کنند قرار گرفته، سپس کل ساختار بین دو لایه دی‌الکتریک محافظ (زیرلایه و رولایه) قرار داده می‌شود تا عملکرد باند وسیع را حفظ کند. در این مقاله، در بخش ۲، ساختار آنتن و طراحی آن مورد بحث قرار می‌گیرد؛ در بخش ۳ مطالعات پارامتری برای بررسی تأثیر بخش‌های مختلف ساختار روی عملکرد آنتن نشان داده شده است. در بخش ۴ نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی آنتن بررسی و باهم مقایسه شده و در بخش ۵ نتیجه‌گیری آمده است.

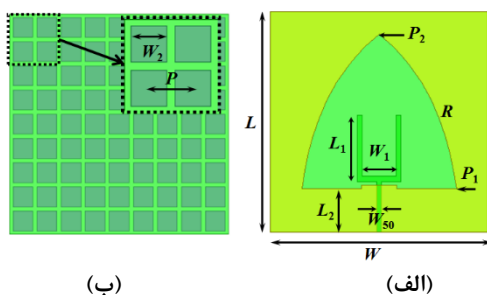
۲- طراحی ساختار آنتن شکافی چندلایه

آنتن پیشنهادی یک ساختار پنج‌لایه شامل یک رولایه دی‌الکتریک [۱۳] برای محافظت، یک لایه نازک از جنس FR4 برای چاپ آنتن شکافی (فلز رویی) و خط تغذیه میکرواستریپ آن (فلز زیرین)، لایه سوم نیز FR4 برای چاپ سطح امیدانس بالای رآکتیو (فلز زیرین)، لایه چهارم یک لایه دی‌الکتریک دیگر [۱۳] و در زیر آن لایه پنجم یعنی فریت است. کل لایه‌ها روی سطح فلزی به‌عنوان صفحه زمین قرار می‌گیرند. ساختار حاصل در شکل ۱ و مشخصات مواد به‌کاررفته در لایه‌های مختلف ساختار آنتن در جدول ۱ آمده است. هر دو لایه FR4 دارای ضخامت ۱/۵۷ mm، $\epsilon_r = 4.4$ و $\tan \delta = 0.02$ است. ترکیب سطح امیدانس بالا (HIS) و لایه فریت برای مدل‌سازی دیواره مغناطیسی

به منظور افزایش پهنای باند آنتن استفاده شده است. همچنین در [۱۷] اشکال مختلف شکاف‌های باریک‌شونده و بازوهای تنظیم برای بهبود تطبیق امپدانس، بهره ثابت و الگوهای تشعشی یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در اینجا آنتن پیشنهادی، از ترکیب ویژگی‌های اصلی آنتن شکافی باریک‌شونده با تغذیه مایکرواستریپ و بازوی تنظیم به شکل دوشاخه بهره می‌برد. پارامترهای مختلف آنتن با استفاده از نرم‌افزار HFSS برای حداکثر پهنای باند، بهره مثبت و نسبت $1^{\text{V}}F/B$ بالاتر در پهنای باند ۴:۱ بهینه شده است. در شکل ۲ آنتن طراحی شده و مقادیر بهینه پارامترها نشان داده شده‌اند: (واحد: میلی‌متر) $W=100, L=100, P=10.5, R=0.3, L_2=19.8, L_1=30, W_2=5.5, W_1=15.4, W_{50}=2.2$ که R نرخ باز شدن تابع نمایی تعریف کننده شکل شکاف، P دوره تناوب ساختار HIS و دو نقطه $P_1(x_1, y_1)$ و $P_2(x_2, y_2)$ با استفاده از معادله (۱) تعریف می‌شود [۱۸].

$$y = c_1 e^{Rx} + c_2 \quad (1)$$

$$c_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}, \quad c_2 = \frac{y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}}$$



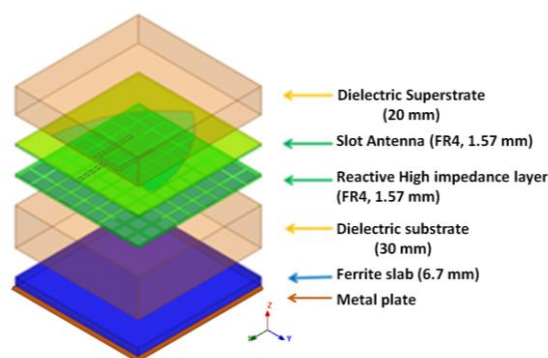
شکل ۲: الف) پارامترهای آنتن شکافی، ب) ساختار سطح امپدانس بالا.

توزیع جریان روی آنتن در چهار فرکانس مختلف در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی شده و در شکل ۳ دیده می‌شود. مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های پایین، چگالی جریان سطحی در بخش شکاف بیشتر است (شکل ۳ الف)) و لبه‌های شکاف به شکل اتو، میزان تشعشع را در فرکانس‌های پایین کنترل می‌کند؛ به تدریج که فرکانس افزایش می‌یابد، چگالی جریان در شکاف رفته‌رفته کاهش یافته و در مقابل افزایش قابل توجهی در جریان جاری در اطراف بازوی دوشاخه دیده می‌شود. از این‌رو، در فرکانس‌های پایین، تشعشع عمدتاً از بخش شکاف و در فرکانس‌های بالا، از خط تغذیه مایکرواستریپ و بازوی تنظیم دوشاخه انجام می‌شود. تطبیق امپدانس با تنظیم پارامترهای خط تغذیه به دست می‌آید.

۳- بررسی پارامتری ساختار آنتن

به منظور بهینه‌سازی طرح آنتن، مطالعات پارامتری روی ابعاد مختلف آن انجام شد. پارامترهای آنتن شامل طول و عرض خط تغذیه مایکرواستریپ با بازوی دوشاخه L_1 و W_1 ، نرخ بازشدگی شکاف آنتن R و اندازه سلول سطح امپدانس بالا W_2 مورد بررسی قرار گرفت. پارامترها برای کاهش حساسیت عملکرد آنتن نسبت به تغییرات، بهبود بهره و افزایش پهنای باند انتخاب شدند.

طراحی شده که برای جلوگیری از معکوس شدن فاز، کاهش سطح گدیرگ‌های کناری، تطبیق امپدانس مناسب در پهنای باند وسیع و افزایش بهره آنتن به کار می‌رود [۱۴].



شکل ۱: ساختار آنتن چندلایه پیشنهادی.

جدول ۱: مشخصات لایه‌های مختلف ساختار آنتن شکافی

لایه	ضخامت	مشخصات	کارکرد
Dielectric superstrate (Fiberglass Ballistic Panel)	20 mm	$\epsilon_r = 4.3$	محافظ
FR4	1.57 mm	$\epsilon_r = 4.4$ $\tan \delta = 0.02$	المان تشعشی (شکاف) در بالا و خط تغذیه مایکرواستریپ در پایین
FR4	1.57 mm	$\epsilon_r = 4.4$ $\tan \delta = 0.02$	سطح HIS در لایه فلزی پایین
Dielectric substrate (Fiberglass Ballistic Panel)	30 mm	$\epsilon_r = 4.3$	جلوگیری از تخریب بهره
Ferrite slab	6.7 mm	---	حذف تشعشع از پشت آنتن
Metal plate	---	---	صفحه زمین آنتن

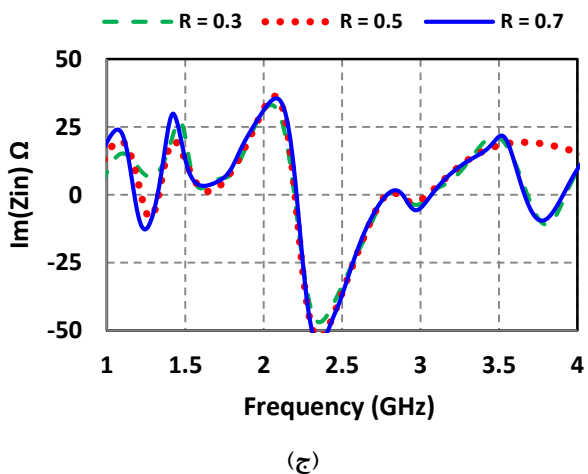
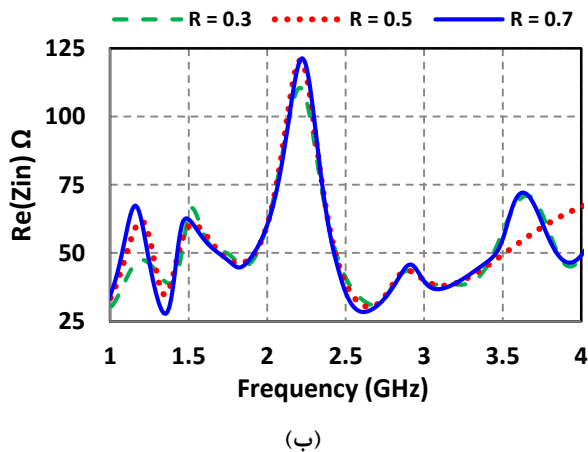
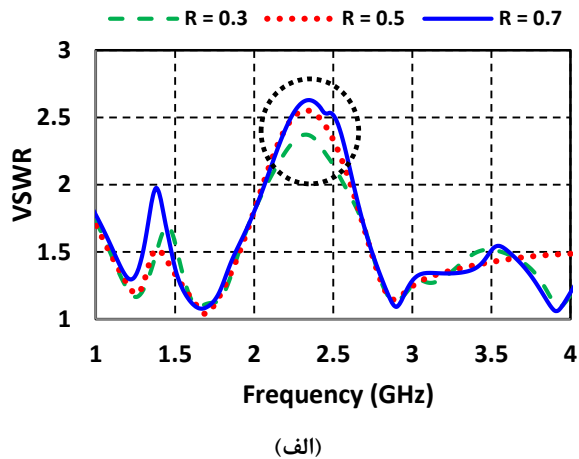
لایه فریت استفاده شده به عنوان جاذب از تولیدات شرکت ETS-Lindgren و از نوع FT-2000 [۱۵] است. عملکرد جاذب‌های فریتی ETS به فرکانس‌های پایین در حد چند صد مگاهرتز محدود می‌شود و ساختار EBG در باند فرکانسی محدود (پهنای باند ۲:۱) عمل می‌کند [۱۶] که می‌توان آن را طوری طراحی کرد که حد بالای پهنای باند مورد نظر را پوشش دهد. صفحه زمین مرکب شامل لایه جاذب فریتی برای جذب تشعشع از عقب آنتن در فرکانس‌های پایین و ساختار EBG برای ایجاد فاز مناسب برای امواج انعکاسی از پشت آنتن در فرکانس‌های بالاتر از محدوده فرکانسی که جاذب فریت کار می‌کند، عمل می‌کند و در نتیجه پهنای باند وسیع‌تر از حالتی خواهد بود که فریت یا ساختار EBG به تنهایی در ساختار آنتن به کار رفته باشند. مشخصات جاذب فریتی FT-2000 در چند فرکانس مختلف در جدول ۲ آمده است [۸، ۱۵].

جدول ۲: مشخصات جاذب فریتی FT-2000

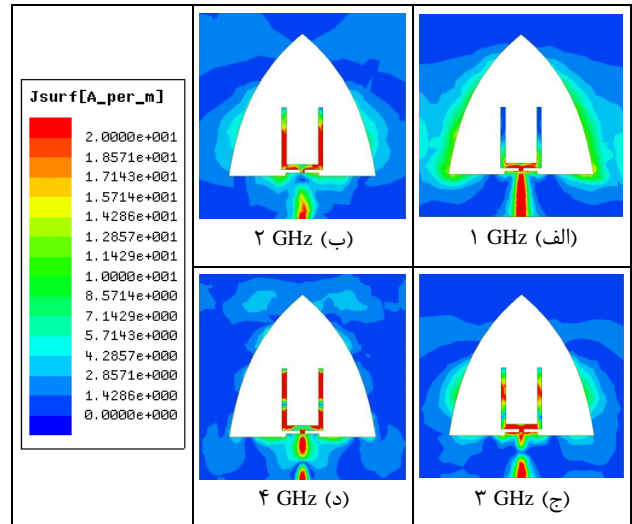
فرکانس	ضریب گذردهی الکتریکی	ضریب گذردهی مغناطیسی	تانژانت تلف دی‌الکتریک
۰/۱	۱۰/۹۱۹	۱۵/۹۵۷	۰/۰۰۲۲
۰/۵	۱۰/۹۴۸	۰/۲۱۳	۰/۰۰۳۱۱
۱/۰	۱۰/۷۳۲	۰/۵۱۱	۰/۰۰۶۷۱
۲/۰	۱۰/۷۲۷	۰/۴۶۸	۰/۰۱۴۱۷

در [۶] برای تغذیه آنتن شکافی از یک خط مایکرواستریپ دوشاخه

پارامتر دوم، نرخ بازشدگی آنتن، R ، است که در شکل ۵ (الف)-(ج) نشان داده شده است. هرچه میزان بازشدگی کمتر می‌شود، اندکی بهبود در عملکرد آنتن به‌خصوص در فرکانس‌های پایین دیده می‌شود. از سوی دیگر، وقتی میزان بازشدگی بیشتر می‌شود، باعث افزایش قسمت‌های حقیقی و موهومی امپدانس ورودی شده و عدم تطبیق امپدانس قابل ملاحظه‌ای در باند میانی فرکانس ایجاد می‌شود.

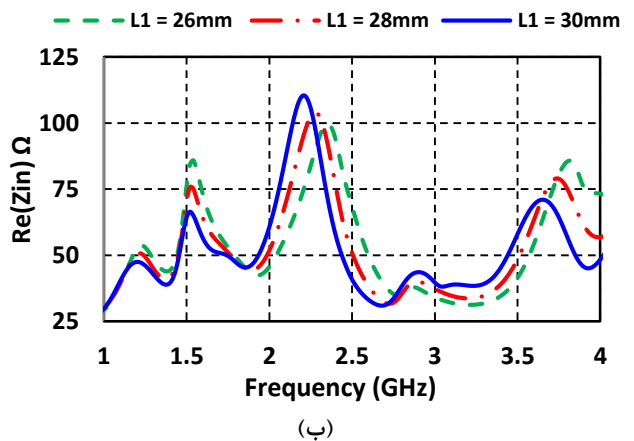
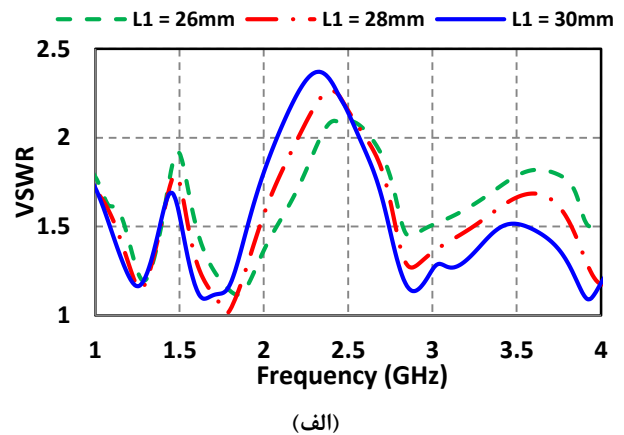


شکل ۵: اثر نرخ بازشدگی R بر (الف) VSWR ورودی، (ب) قسمت حقیقی و (ج) موهومی امپدانس ورودی.



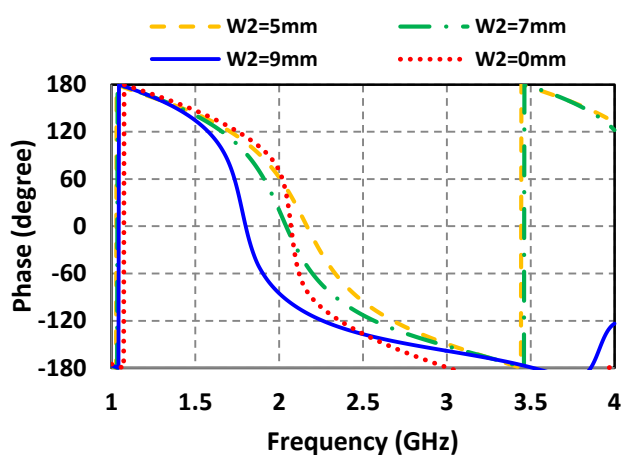
شکل ۳: توزیع جریان در شکاف و خط میکرواستریپ در فرکانس‌های مختلف.

اولین پارامتر بررسی‌شده، طول دوشاخه، L_1 ، است. L_1 دارای اثر القایی روی امپدانس ورودی است و لذا باعث تغییر فرکانس رزونانس می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ (الف) و ۴ (ب) دیده می‌شود، افزایش L_1 باعث بهبود در حد پایین پهنای باند می‌شود، اما عملکرد آنتن را در مرکز باند تخریب می‌کند.



شکل ۴: اثر طول خط تغذیه میکرواستریپ بر روی (الف) VSWR ورودی و (ب) قسمت حقیقی امپدانس ورودی.

محاسبه و در شکل ۷ نشان داده شده است. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به ازای $W_2 = 5 \text{ mm}$ در محدوده فرکانسی $1/75 \text{ GHz} - 2/5 \text{ GHz}$ ، شیفت فاز غیرمعکوس (یعنی $90^\circ < \varphi < -90^\circ$) برای ساختار متناوب «نامحدود» مشاهده می‌شود. اما ابعاد سطح امپدانس بالای استفاده شده، محدود $(10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm})$ و تنها شامل 9×9 سلول واحد است و پهنای باند وسیع‌تر با بهینه‌سازی ساختار می‌تواند به دست آید.



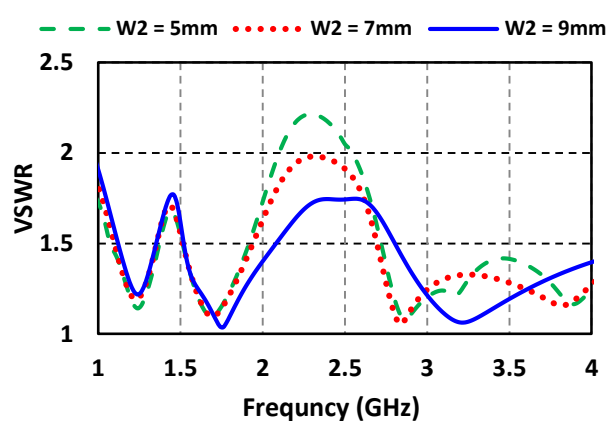
شکل ۷: فاز موج انعکاس یافته از سطح امپدانس بالا.

پارامتر مهم دیگر، بررسی تأثیر ابعاد محدود صفحه زمین روی عملکرد تشعشی آنتن است. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، اندازه صفحه زمین تأثیر چندانی روی الگوهای تشعشی و VSWR ندارد. از این رو آنتن با لایه‌های مختلف (لایه‌های دی‌الکتریک و لایه فریت) روی یک صفحه فلزی مربع شکل به ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ به عنوان صفحه زمین قرار گرفته و ساخته می‌شود.

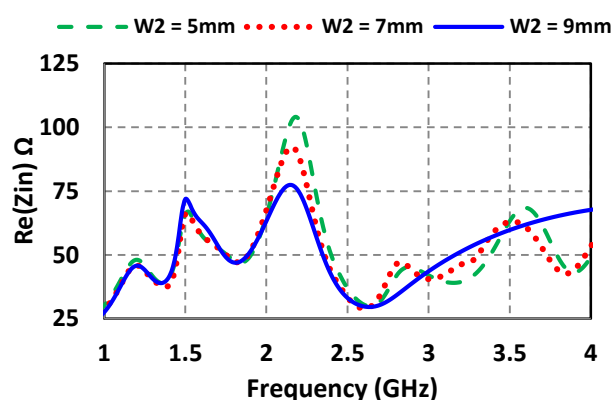
۴- نتایج تست و اندازه‌گیری مشخصات تشعشی آنتن

نمونه ساخته شده آنتن چندلایه پیشنهادی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. برای ساخت آنتن چندلایه، بعد از چاپ آنتن شکافی و ساختار EBG، بقیه کارهای ساخت آنتن با دست انجام گرفته است. لایه‌های مختلف بعد از برش به اندازه ابعاد آنتن شکافی با لایه‌های بسیار نازک از چسب دی‌الکتریک prepreg ($\epsilon_r=4.35$) به هم چسبانده شده و تحت گرما و فشار قرار گرفتند تا ضخامت لایه چسب تا حد امکان کاهش یابد (μm) (۱-۲). اندازه‌گیری تلف بازگشتی آنتن با استفاده از تحلیل‌گر شبکه 18 از نوع Agilent E8363B و الگوهای تشعشی در داخل اتاق جذب و با استفاده از آنتن شیپوری استاندارد به عنوان آنتن فرستنده انجام شده است.

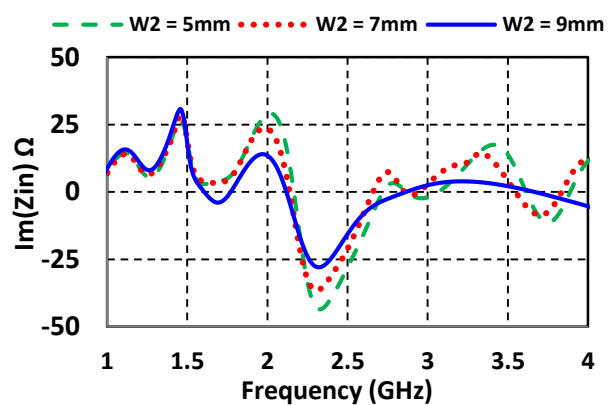
ساختارهای مختلف با/بدون لایه‌های زیرین آنتن مورد بررسی و تست قرار گرفتند. ابعاد فیزیکی آنتن با مجموعه لایه‌های مربوطه $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ یعنی $6/5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ در پایین‌ترین فرکانس کار یعنی ۱ GHz است.



(الف)



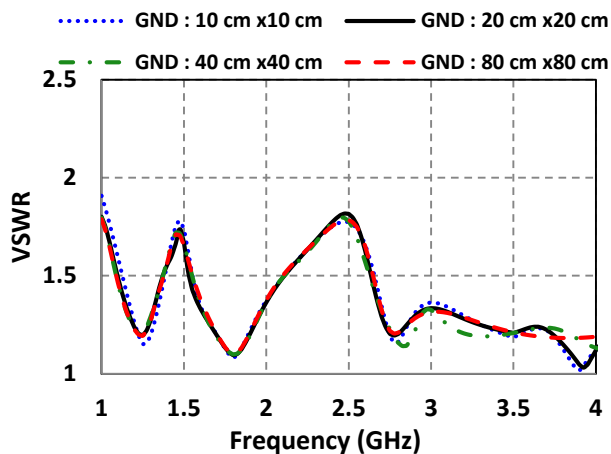
(ب)



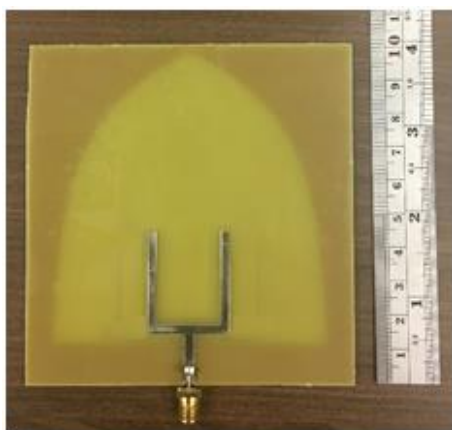
(ج)

شکل ۶: اثر عرض سلول واحد سطح امپدانس بالا (W_2) روی (الف) VSWR ورودی، (ب) قسمت حقیقی و (ج) موهومی امپدانس ورودی.

سومین مورد، سطح امپدانس بالای رآکتیو است که دارای دو پارامتر W_2 و دوره تکرار سلول‌های ساختار متناوب، P ، است و در شکل ۲ مشخص شده‌اند. هر دو پارامتر سلول واحد، بخش‌های حقیقی و موهومی امپدانس ورودی آنتن را کنترل کرده و اثر قابل توجهی روی تطبیق آنتن دارند. تغییرات VSWR و امپدانس ورودی آنتن برحسب این دو پارامتر در شکل ۶ (الف)-(ج) نشان داده شده است. علاوه بر این، ساختار تناوبی سطح امپدانس بالا، فاز موج انعکاسی را تعیین می‌کند. فاز انعکاس برای مقادیر مختلف عرض شبکه مربعی با استفاده از تحلیل مدهای فلوکه HFSS



شکل ۹: اثر ابعاد صفحه زمین (GND) روی VSWR ورودی آنتن.



(الف) آنتن شکافی

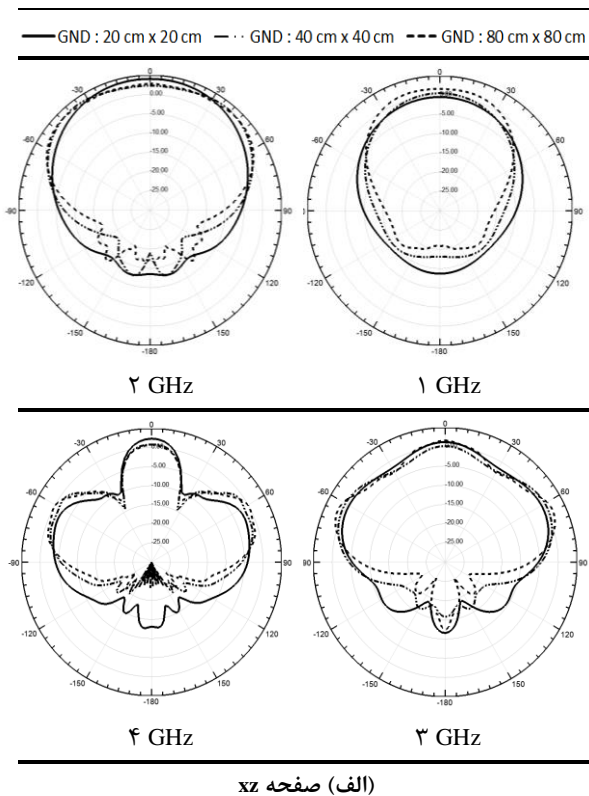


(ب) آنتن جاسازی شده در ساختار چندلایه

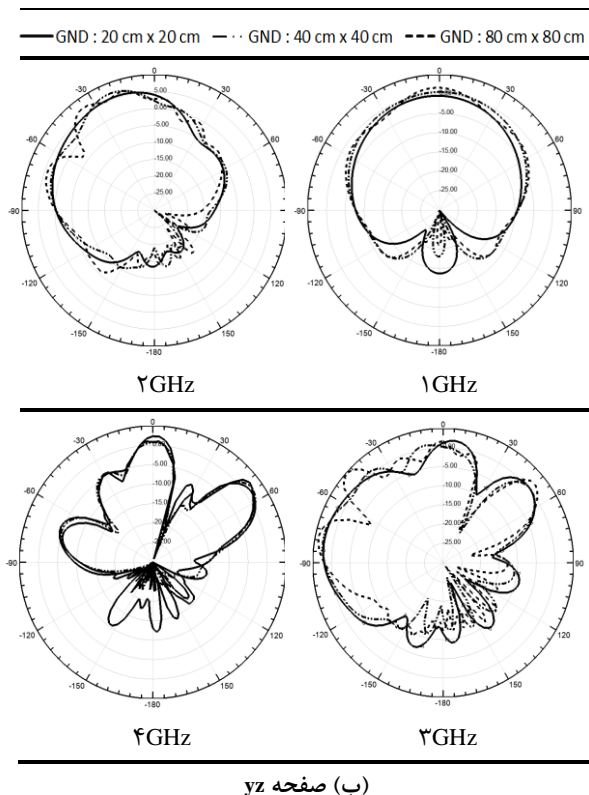
شکل ۱۰: نمونه ساخته شده آنتن پیشنهادی که در بین لایه های فایبرگلاس جاسازی شده است.

۴-۱- اندازه گیری تلف بازگشتی آنتن

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود نتایج VSWR حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری تطابق خوبی باهم دارند و تطبیق بهتر از ۱۰ dB در محدوده فرکانسی ۱ GHz تا ۴ GHz را نشان می دهد.

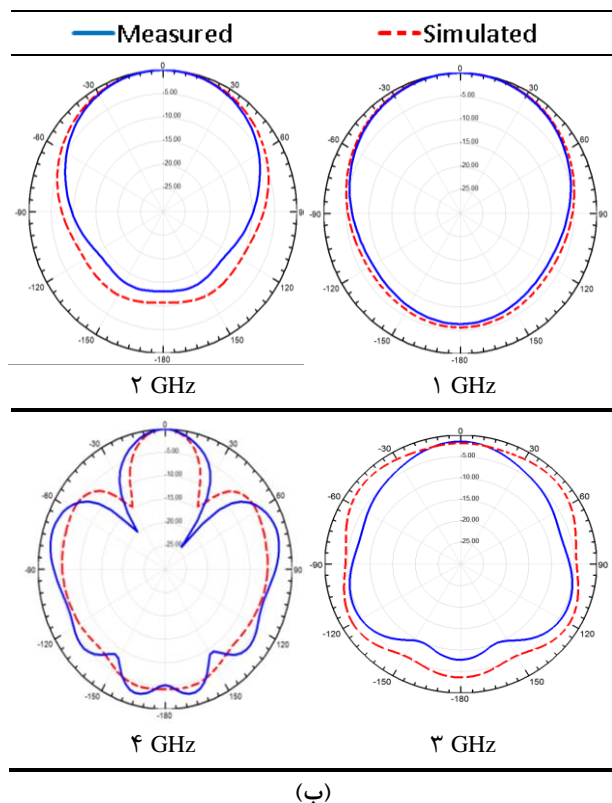
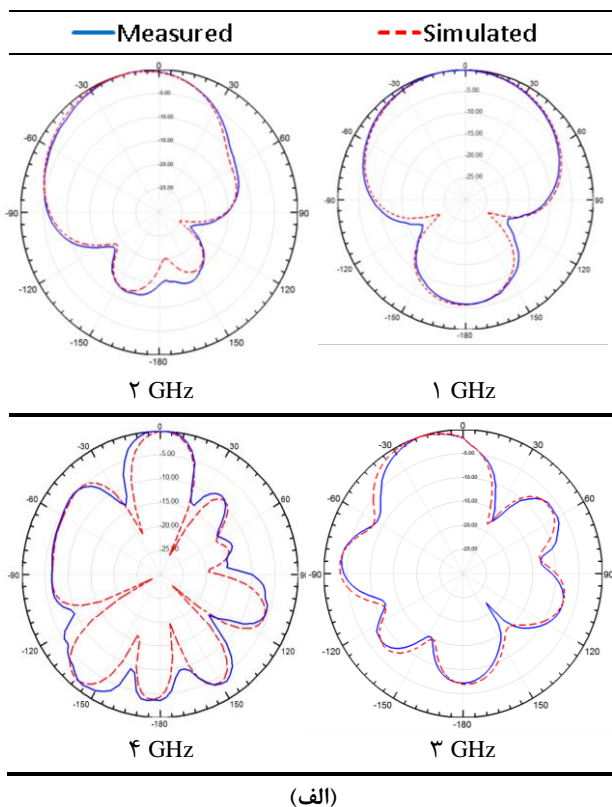


(الف) صفحه xz



(ب) صفحه yz

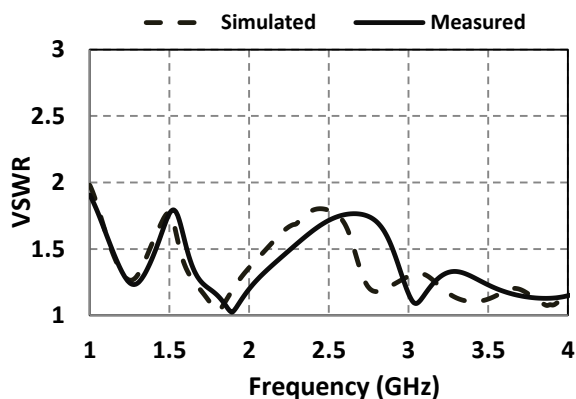
شکل ۸: اثر ابعاد صفحه زمین (GND) روی الگوهای تشعشی آنتن.



شکل ۱۲: الگوهای تشعشعی در (الف) صفحه xz، (ب) صفحه yz.

۵- نتیجه‌گیری

یک آنتن شکافی UWB با ساختار چندلایه، الگوی تشعشعی تقریباً یک‌طرفه و پهنای باند وسیع ارائه شد. سطح المان تشعشعی با یک لایه



شکل ۱۱: نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری VSWR آنتن.

۴-۲- الگوی تشعشعی و بهره آنتن

الگوهای تشعشعی آنتن در دو صفحه متعامد در شکل ۱۲ رسم شده‌اند. بهره آنتن در محدوده فرکانسی ۱ GHz تا ۴ GHz مثبت و به ترتیب برابر ۰/۹، ۱/۸، ۲/۶ و ۱/۹ dB در فرکانس‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ GHz است. همان‌طور که از شکل مشخص است، نتایج اندازه‌گیری خیلی شبیه به نمونه‌های شبیه‌سازی شده است.

در شکل ۱۳ کارایی^{۱۹} آنتن در فرکانس‌های مختلف محاسبه و رسم شده است. در پهنای باند موردنظر (۱GHz-۴GHz)، کارایی آنتن بیشتر از ۵۰٪ است که به خاطر افزودن لایه جاذب فریت و همچنین استفاده از زیرلایه‌های تلفاتی RF4 میزان آن کاهش یافته است. استفاده از زیرلایه‌های کم تلف می‌تواند به بهبود کارایی آنتن کمک کند.

در شکل ۱۴ بهره بیشینه حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن ابتدا با لایه HIS و سپس با حذف این لایه در فرکانس‌های مختلف مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بدون لایه HIS، بهره آنتن افت قابل توجهی (~۶ dB) در محدوده فرکانسی ۱/۵GHz تا ۲/۵GHz دارد. در مقابل، حضور HIS نه تنها عملکرد آنتن در این محدوده فرکانسی را بهبود می‌دهد، بلکه باعث افزایش بهره در کل پهنای باند می‌شود. اختلاف بین نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ممکن است به خاطر ایده‌آل نبودن کانکتور و کابل‌های استفاده شده در اندازه‌گیری، خطای تنظیم آنتن اندازه‌گیری نسبت به آنتن فرستنده، خطای ساخت و اثر چسب به کاررفته بین لایه‌ها باشد که در شبیه‌سازی لحاظ نشده‌اند. به علاوه، ضریب دی‌الکتریک لایه‌های فایبرگلاس در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است که ممکن است خطای اندازه‌گیری یا ناهمگن بودن این مواد در میزان اختلاف بین نتایج ساخت و شبیه‌سازی مؤثر باشد.

در جدول ۳ تعدادی طرح مشابه که در ساختار آن‌ها EBG به کار رفته است، از نظر ابعاد، پهنای باند امیدانسی، بهره، میزان لوب پشتی (FBR) و پیچیدگی ساخت با نمونه آنتن پیشنهادی مقایسه شده است که کارآمد بودن طرح ارائه شده را به خصوص از نظر سهولت ساخت، ابعاد عرضی کوچک و پهنای باند وسیع نشان می‌دهد.

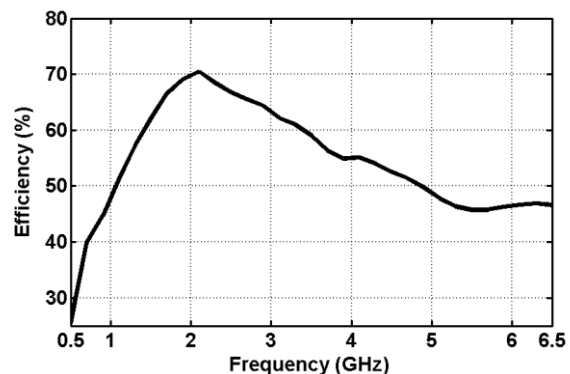
جدول ۳: مقایسه عملکرد طرح پیشنهادی با طرح‌های مشابه

امکان ساخت	FBR (dB)	بهره (dB)	پهنای باند (%)	ابعاد (ضخامت×عرض×طول)	مرجع
راحت	۱۲	۹-۵	۲۲/۴	۰/۸۹λ×۰/۸۹λ×۰/۸۸λ	[۷]
مشکل	۱۸ (شبییه‌سازی)	۱۸-۰/۵ (دایرکتیویته)	۱۸۳	۲/۵۶λ×۲/۵۶λ×۰/۳۴λ	[۸]
خیلی مشکل	---	۱۰/۲ (شبییه‌سازی)	۶۶/۶	۰/۱۱λ×۰/۱۱λ×۰/۱۴λ	[۹]
مشکل	۲۰-۸	<0	۱۴/۶	۲/۴۶λ×۲/۴۶λ×۰/۰۴λ	[۱۲]
مشکل	۲۳ (شبییه‌سازی)	۸/۵ (دایرکتیویته)	۷/۷	۱/۱λ×۱/۱λ×۰/۰۴λ	[۱۴]
راحت حاضر	۱۳-۷	۳-۱	۱۲۰	۰/۳۳λ×۰/۳۳λ×۰/۲۲λ	

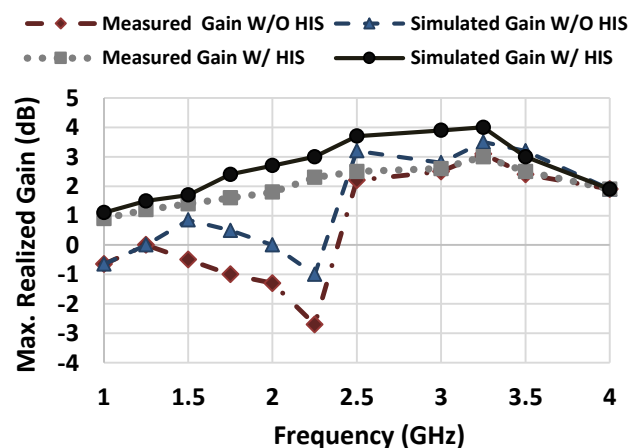
مراجع

- [۱] فرهاد خسروی افوسی، محمدنقی آذرمنش و جواد نوری‌نیا، «به‌کارگیری ساختارهای EBG به‌منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویته آنتن مایکرواستریپ»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۳، شماره ۲، صفحه ۸-۱، ۱۳۹۲.
- [2] R. K. Sarin and S. Singh, "Impedance characteristics for microstrip-fed wide slot antenna using volume integral equation approach," Proc. of the 11th Int. WSEAS Conf. on Communication, Greece, July 26-27, 2007.
- [3] J-Y Jan, C-Y Hsiang, Y-T Cheng, and W-S Chen, "Printed microstrip-line-fed wideband slot antenna with a hexagonal slot," IEEE Int. Symp. Ant. Propag. Soc., Washington, DC, USA, July 3-8, 2005.
- [۴] ایمان مجیدی، حسین همتی و سیدحسن صدیقی «طراحی آنتن چهارتایی شکافی فشرده با قطبش دایروی برای به‌کارگیری در گیرنده GPS»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحات ۲۹۹-۳۰۶، ۱۳۹۵.
- [5] H. Eskandari, M. N. Azarmanesh, "Bandwidth enhancement of a printed wide-slot antenna with small slots," AEU- Int. J. Electronics and Communication, vol. 63, no. 10, pp. 896-900, Oct. 2009.
- [6] J. Y. Sze and K. L. Wong, "Bandwidth enhancement of a microstrip-line-fed printed wide-slot antenna," IEEE Trans. Ant. Propag., vol. 49, no. 7, pp. 1020-1024, 2001.
- [7] S. Chaimool, C. Raklua, and P. Akkaraekthalin, "Low-profile unidirectional microstrip-fed slot antenna using metasurface," Int. Symp. Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Chiang Mai, Thailand, Dec. 7-9, 2011.
- [8] J. M. Bell, M. F. Iskander, and J. J. Lee, "Ultra wideband hybrid EBG/ferrite ground plane for low-profile array antennas," IEEE Trans. Ant. Propag., vol. 55, no.1, pp. 4-12, Jan. 2007.
- [9] J. T. Rayno, J. S. K. Nakatsu, G. C. Huang, N. Celik, and M. F. Iskander, "3D metamaterial broadband ground plane designed using genetic programming for the long slot array antenna," IEEE Int. Symp. Ant. Propag. Soc. (APSURSI), pp. 400-401, Orlando, FL, USA, 7-13 July 2013.
- [10] D. J. Kern, M. J. Wilhelm, D. H. Werner, and P. L. Werner, "A novel design technique for ultra-thin tunable EBG AMC surfaces," IEEE Int. Symp. Ant. Propag. Soc., pp.

دی‌الکتریک برای محافظت پوشیده شده و در زیر آن از لایه‌های HIS و فریت برای افزایش پهنای باند و حذف گلبرگ عقبی استفاده شده است. زمین ترکیبی^{۲۰} چندلایه شامل HIS و فریت، یک دیواره مغناطیسی مصنوعی را مدل‌سازی کرده و مانع معکوس شدن فاز موج بازتاب می‌شود؛ همچنین منجر به افزایش بهره در جهت برادساید و مانع افت بهره در باند میانی پهنای باند می‌شود. استفاده از یک لایه دی‌الکتریک ضخیم بین لایه HIS و فریت، اثرات تلفاتی بیش‌ازحد فریت روی آنتن شکافی و افت بهره را کاهش می‌دهد. آنتن چندلایه دارای ابعاد نسبتاً کوچک $۱۰\text{cm} \times ۱۰\text{cm} \times ۶/۵\text{cm}$ و ساختار ساده برای ساخت است. این آنتن در پهنای باند فرکانسی وسیع (با نسبت ۴:۱) دارای بهره مثبت بزرگ‌تر از ۱ dB است که به‌خاطر استفاده از لایه‌های فریت و HIS به‌دست آمده است (بزرگ‌تر از ۲ dB در محدوده فرکانسی ۱/۵ GHz تا ۴ GHz).



شکل ۱۳: تغییرات کارایی آنتن نسبت به فرکانس.



شکل ۱۴: مقایسه بهره به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی آنتن با و بدون لایه HIS.

سپاس‌گزاری

از پروفسور فتحی و اعضای تیم آزمایشگاه آنتن ایشان در دانشگاه تنسی- آمریکا که در ساخت و اندازه‌گیری آنتن مرا یاری نمودند، نهایت تشکر و سپاس را دارم.

- characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications,” IEEE Trans. on Ant. Propag., vol. 51, no. 10, pp. 2691–2703, 2003.
- [15] ETS-Lindren/Rantec, *EMC Anechoic Absorber ferrite Tile FT-2000*, <http://www.ets-lindgren.com/PDF/FT-2000.pdf>.
- [16] J. M. Bell and M. F. Iskander, “A low-profile archimedean spiral antenna using an EBG ground plane,” *Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 3, pp. 223–226, 2004.
- [17] R. Azim, M. T. Islam, and N. Misran, “Compact tapered-shape slot antenna for UWB applications,” *IEEE Ant. Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 1190–1193, 2011.
- [18] J. Gibson, “The Vivaldi aerial,” *Proc. 9th European Conf. Brighton*, pp. 101–105, U.K., 1979.
- 1167–1170, Monterey, CA, USA, June 2004.
- [11] M. E. De Cos, F. Las Heras, and M. Franco, “Design of planar artificial magnetic conductor ground plane using frequency-selective surfaces for frequencies below 1 GHz,” *IEEE Ant. and Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 951–954, 2009.
- [12] C. Wang, D-B Yan, and N-C Yuan, “Application of high impedance electromagnetic surface to Archimedean planner spiral antenna,” *Microwave and Optical Technology Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 129–131, 2007.
- [13] Fiber-Tech Industries. *Armor/Ballistic E-Glass Fiberglass Panels*, <http://www.fiber-tech.net/armor-ballistic-e-glass-fiberglass-panels>.
- [14] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, “Reflection phase

زیر نویس ها

¹¹- mushroom type vias

¹²- metamaterial

¹³- artificial magnetic conductor

¹⁴- via

¹⁵- tapered wide slot antenna

¹⁶- tuning

¹⁷- Front to Back Ratio

¹⁸- Network Analyzer

¹⁹- efficiency

²⁰- hybrid ground plane

¹- fork-shaped stub

²- High Impedance Surface (HIS)

³- Ultra Wide Band (UWB) antenna

⁴- back lobes

⁵- broadside

⁶- wide slot antenna

⁷- patch

⁸- Electromagnetic Band Gap

⁹- cavity

¹⁰- metasurface