



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 2, pp.: 46-60
2024

DOI:
10.22034/jsssta.2023.398147.1125

Article Info

Received: 2023-05-19
Accepted: 2023-10-02

Keywords

Magneto electric dipole antenna, AMC, Height Reduction, Linear polarization, circular polarization

How to Cite this article

Mohammadhossein Ashori, Saeed Fakhte, Iman Aryanian, "Height Reduction of Circular and Linearly Polarized Magneto-electric Dipole Antenna through Artificial Magnetic Conductor", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (2), p.: 46-60, 2024.

Height Reduction of Circular and Linearly Polarized Magneto-electric Dipole Antenna through Artificial Magnetic Conductor

Mohammadhossein Ashori¹, Saeed Fakhte^{2*}, Iman Aryanian³

1.Qom University of Technology, Qom, Iran, ashouri.m@qut.ac.ir

2.*Qom University of Technology, Qom, Iran, fakhte@qut.ac.ir

3.Iran Telecommunication Research Center, Tehran, Iran, aryanian@itrc.ac.ir

Abstract

In this article, a solution for reducing the height of magneto-electric dipole antennas is presented by using an artificial magnetic conductor structure as the antenna's ground plane. In this research, two types of antennas were investigated: The first antenna is linearly polarized and the second antenna is right-handed circularly polarized. In the linearly polarized antenna, a 7×7 array of artificial magnetic conductor cells (AMCs) was designed at 3.5 GHz and placed on the antenna's ground plane. By adding artificial magnetic conductor, the height of the first antenna was reduced to 0.16λ . The simulation results show that the impedance bandwidth for values of $|S_{11}| < [-10\text{dB}]$ is equal to 1.9 GHz from the frequency of 2.3 GHz to 4.2 GHz (58.46%), while the measured impedance bandwidth of fabricated prototype is equal to 2.13 GHz from the frequency of 2.21 GHz to 4.34 GHz (65.03%).

The second antenna is a right-handed circularly polarized magneto-electric dipole antenna which is fed by a Y-shaped feed line. By using a 5×5 array of AMC on the ground plane of the antenna, its height was reduced to 0.13λ . The impedance bandwidth resulting from the simulation for values $|S_{11}| < [-10\text{dB}]$ is equal to 1.24 GHz from the frequency 2.46 GHz to the frequency of 3.7 GHz (40.25%), while the bandwidth resulting from the measurement of the fabricated prototype is equal to 1.3 GHz from the frequency of 2.38 GHz up to the frequency of 3.68 GHz (44.52%).



کاهش ارتفاع آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش دایروی و خطی با استفاده از رسانای مغناطیسی مصنوعی

محمد حسین عشوری^۱، سعید فاخته^۲، ایمان آریانیان^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران ashouri.m@qut.ac.ir

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران fakhte@qut.ac.ir

۳- استادیار، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران aryanian@itrc.ac.ir

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۲، صفحه ۶۰-۴۶
پاییز و زمستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jssta.2023.398147.1125

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰

واژه‌های کلیدی

آنتن دو قطبی مغناطیسی
الکتریکی، کاهش ارتفاع، رسانای
مغناطیسی مصنوعی، قطبش
خطی، قطبش دایروی

نحوه استناد به این مقاله

محمد حسین عشوری، سعید فاخته،
ایمان آریانیان، " کاهش ارتفاع آنتن
دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش
دایروی و خطی با استفاده از رسانای
مغناطیسی مصنوعی"، دو فصلنامه
علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد
سوم، شماره دوم، صفحات ۶۰-۴۶،
۱۴۰۲.

چکیده

در این مقاله راه حلی برای کاهش ارتفاع آنتن های دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با استفاده از ساختار هادی مغناطیسی مصنوعی به عنوان صفحه زمین آنتن ارائه شده است. در این تحقیق دو نوع آنتن مورد بررسی قرار گرفت: آنتن اول با قطبش خطی و آنتن دوم با قطبش دایروی راستگرد است. در آنتن با قطبش خطی، یک آرایه 7×7 از سلول های رسانای مغناطیسی مصنوعی (AMCs) در فرکانس ۳.۵ گیگاهرتز طراحی شد و روی صفحه زمین آنتن قرار گرفت. با افزودن هادی مغناطیسی مصنوعی، ارتفاع آنتن اول به 0.16λ کاهش یافت. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که پهنای باند امپدانس برای مقادیر $[-10\text{dB}] < |S_{11}|$ برابر با ۱.۹ گیگاهرتز از فرکانس ۲.۳ گیگاهرتز تا ۴.۲ گیگاهرتز (۵۸.۴۶ درصد) است، در حالی که پهنای باند امپدانس اندازه گیری شده نمونه ساخته شده برابر با ۲.۱۳ گیگاهرتز از فرکانس ۲.۲۱ گیگاهرتز تا ۴.۳۴ گیگاهرتز (۶۵.۰۳ درصد) است. آنتن دوم یک آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش دایروی راستگرد است که توسط یک خط تغذیه Y شکل تغذیه می شود. با استفاده از یک آرایه 5×5 AMC در صفحه زمین آنتن، ارتفاع آن به 0.13λ کاهش یافت. پهنای باند امپدانس حاصل از شبیه سازی برای مقادیر $[-10\text{dB}] < |S_{11}|$ برابر است با ۱.۲۴ گیگاهرتز از فرکانس ۲.۴۶ گیگاهرتز تا فرکانس ۳.۷ گیگاهرتز (۴۰.۲۵٪)، در حالی که پهنای باند حاصل از اندازه گیری نمونه ساخته شده برابر با ۱.۳ گیگاهرتز از فرکانس ۲.۳۸ گیگاهرتز تا فرکانس ۳.۶۸ گیگاهرتز (۴۴.۵۲٪) می باشد.

۱-مقدمه

با توجه به پیشرفت روزافزون در ارتباطات رادیویی و اینترنت، نیاز هرچه بیش تر به آنتن‌های کوچک و با بهره بالا احساس می‌شود. آنتن‌های با اندازه کوچک و بهره تشعشی بالا در ارتباطات رادیویی نقش به‌سزایی دارند [۱-۲]. یکی از آنتن‌های جذاب برای کاربرد در ارتباطات رادیویی و اینترنت نسل پنجم ارتباطات همراه زیر ۶ گیگاهرتز، آنتن دو قطبی مغناطیسی-الکتریکی است. این آنتن‌ها دارای خواص جالبی مانند نسبت کسری بالای سطح گلبرگ جلو به گلبرگ عقب (نسبت جلو به عقب) الگوی تشعشی، بهره تشعشی پایدار نسبت در بازه فرکانسی عملیاتی، اندازه قطبش متقاطع کم و پهنای باند امپدانس گسترده هستند. بزرگ‌ترین عیب این آنتن‌ها، اندازه بزرگ آن‌ها است [۳-۴]. لایو وونگ^۱ در مطالعه خود [۵] یک آنتن دوقطبی ME برای استفاده در کاربردهای 5G زیر ۶ گیگاهرتز ارائه داده اند که بر اساس فناوری موج‌بر مجتمع شده در زیرلایه (SIW²) پیاده‌سازی شده است. در ساختار گزارش شده در مطالعه فنگ^۳ و دیگران [۶]، ترکیبی از (SIW) و فراسطح برای دستیابی به آنتن دوقطبی MIMO ME برای کاربردهای 5G/WIMAX/WLAN گزارش کرده‌اند. فنگ و همکاران در مطالعه‌ای دیگر، یک سیستم آنتن MIMO مبتنی بر آنتن‌های دوقطبی ME توسعه داده‌اند که دارای هندسه همدیس نازک است [۷]. در کار دیگری که توسط فنگ و همکاران گزارش شده [۸]، یک آرایه آنتن دوقطبی ME با ویژگی فیلترکنندگی سیگنال پیشنهاد شده که در باند 24.25-27.5 GHz (n258 5G) کار می‌کند. در مطالعه فاخته، ظهیر جوزدانی و ظریفی [۹] نیز، ارتفاع آنتن‌های دوقطبی ME $\lambda/4$ و اندازه افقی دو قطبی الکتریکی که در بالای دو قطبی مغناطیسی قرار می‌گیرد برابر با $\lambda/2$ است. اغلب مطالعات بر روی این آنتن‌ها متمرکز بر ارائه روش‌های تغذیه جایگزین یا کاهش ارتفاع این آنتن‌ها است. به عنوان مثال کدور^۴ و همکاران در مطالعه خود [۱۰]، با بارگذاری خازنی بین دو دیواره عمودی، کوچک‌سازی آنتن را امکان پذیر کرده اند. در حالی که در [۱۱]، ساختار صفحه زمین معیوب برای کاهش ضخامت دی الکتریک را پیشنهاد کرده اند. یکی دیگر از

روش‌های کوچک‌سازی آنتن‌های دوقطبی ME، استفاده از ساختار رسانای مصنوعی است. این ساختار به عنوان یک بازتابنده امواج الکترومغناطیسی عمل کرده و می‌تواند ارتفاع آنتن را تا حد قابل توجهی کاهش دهد [۱۲]. از این تکنیک کوچک‌سازی، در آنتن‌های دوقطبی و مدار چاپی استفاده شده است [۱۳-۱۴].

از آنجایی که ساختار سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی (AMC^۶) می‌تواند بازتاب نسبتاً کامل امواج با تغییر فاز صفر درجه را میسر کند، استفاده از آن بر روی صفحه زمین می‌تواند ارتفاع آنتن را کاهش دهد [۱۵-۱۶]. علاوه بر این، با استفاده از این ساختارها می‌توان مشابه ساختارهای باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG^۷)، از انتشار امواج سطحی جلوگیری نموده و توزیع متقابل بین عناصر آرایه آنتن‌ها را کاهش داد [۱۷].

هدف اصلی این تحقیق، به‌کارگیری ساختار رسانای مغناطیسی مصنوعی برای کاهش ارتفاع آنتن‌های دو قطبی مغناطیسی الکتریکی در قطبش‌های خطی و دایروی است. در این تحقیق، با استفاده از ساختار رسانای مغناطیسی مصنوعی، سعی شده تا ارتفاع آنتن‌های دو قطبی مغناطیسی الکتریکی به حداقل برسد. ساختار مقاله به صورت زیر دسته‌بندی شده است: در بخش ۲، به بررسی مکانیزم عملکرد آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی و همچنین رسانای مغناطیسی مصنوعی پرداخته شده است. در بخش ۳، آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش خطی در حضور صفحه زمین از جنس رسانای مغناطیسی مصنوعی مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش ۴، به مطالعه آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش دایروی با صفحه زمین از جنس رسانای مغناطیسی مصنوعی پرداخته شده است. در بخش ۵، نتایج حاصل از اندازه‌گیری دو نمونه با قطبش خطی و دایروی پرداخته شده است. سرانجام، در قسمت ۶، نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

⁵ Shuai& Wang

⁶ Artificial Magnetic Conductor

⁷Electromagnetic band-gap

¹Lai& Wong

² Substrate integrated waveguide

³ Feng

⁴ Kaddour

۲- بررسی تئوری آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی و رسانای مغناطیسی مصنوعی

۱-۲ مکانیزم عملکرد آنتن‌های دوقطبی مغناطیسی الکتریکی

در ادامه، مکانیزم عملکرد آنتن دو قطبی مغناطیسی الکتریکی به صورت تحلیلی بررسی شده است. یک دوقطبی الکتریکی با طول d_y که در امتداد محور y قرار می‌گیرد، می‌تواند معادل یک جریان الکتریکی $I = H_x dx$ باشد. از این‌رو، میدان الکتریکی در ناحیه میدان دور را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۰]:

$$\vec{E} = -j \frac{I d_y}{2\lambda r} \eta (e_\theta \cos \theta \sin \varphi + e_\varphi \cos \varphi) e^{-jkr} \quad (1)$$

که در آن η امپدانس ذاتی فضای آزاد، λ طول موج فضای آزاد و r فاصله آنتن تا نقطه مشاهده است. در حالی که یک دوقطبی هرتزی مغناطیسی با طول d_x که در امتداد محور x قرار می‌گیرد، معادل یک جریان مغناطیسی است که $I_m = E_y dy$ از این‌رو، میدان الکتریکی در ناحیه میدان دور را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد [۲۰]:

$$\vec{E} = -j \frac{I_m d_x}{2\lambda r} (e_\theta \sin \varphi e_\varphi \cos \theta \cos \varphi) e^{-jkr} \quad (2)$$

یک آنتن مکمل (یا منبع هویگنس^۱) را می‌توان با برانگیختن هم‌زمان دوقطبی هرتزی الکتریکی و دوقطبی هرتزی مغناطیسی با دامنه یکسان به وجود آورد. از این‌رو، میدان الکتریکی تشعشی میدان دور با جمع کردن معادله های ۱ و ۲ به دست می‌آید:

$$\vec{E} = -j \frac{E_y d_x d_y}{2\lambda r} [e_\theta \sin \varphi (1 + \cos \theta) + e_\varphi \cos \varphi (1 + \cos \theta)] e^{-jkr} \quad (3)$$

در نتیجه، الگوهای تابش نرمالیزه شده در صفحات هر φ ثابت، یکسان هستند و می‌تواند به صورت رابطه ۴ بیان شود:

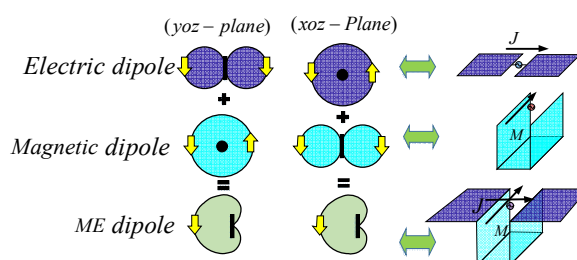
$$F(\theta) = \frac{\sqrt{\sin^2 \varphi (1 + \cos \theta)^2 + \cos^2 \varphi (1 + \cos \theta)^2} (1 + \cos \theta)}{2} \quad (4)$$

برای ترسیم الگوهای تشعشی شکل ۱ از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

۲-۲ مکانیزم عملکرد رسانای مغناطیسی مصنوعی AMC

رساناهای مغناطیسی مصنوعی فرامواد دو بعدی (فراسطح) هستند که معمولاً با استفاده از یک سطح انتخاب‌گر فرکانسی (FSS^2) در فرکانس روزنانس خود طراحی می‌شوند [۲۱-۲۲]. یک AMC در فرکانس تشدید خود، بازتاب فاز یکسانی برای امواج صفحه‌ای نشان می‌دهد [۲۳-۲۴].

آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی نوعی آنتن است که هر دو عنصر دوقطبی مغناطیسی و الکتریکی را برای ارسال یا دریافت امواج الکترومغناطیسی ترکیب می‌کند. ساختار و مکانیزم تشعشع یک آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱) مکانیزم عملکرد و تشعشع آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی

این آنتن متشکل از یک دو قطبی الکتریکی نصف طول موج است که به صورت مسطح قرار می‌گیرد و همانند یک (J) افقی تشعشع می‌کند و دارای یک حفره عمودی به ارتفاع یک چهارم طول موج است که تشعشی شبیه به (M) افقی دارد. دوقطبی‌های مغناطیسی و الکتریکی به صورت متعامد و هم‌زمان با یکدیگر تحریک می‌شوند. یک خط تغذیه که قابلیت تحریک هم‌زمان دوقطبی‌های مغناطیسی و الکتریکی را دارد در وسط آنتن قرار می‌گیرد و به کانکتور SMA متصل می‌شود [۱۸-۱۹]. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، الگوی تابش برای دو قطبی مغناطیسی در صفحه H، شبیه به O است ولی در صفحه E، شکل تشعشع شبیه به 8 است و الگوی تشعشع برای دو قطبی الکتریکی در صفحات E و H دقیقاً برعکس الگوی تابش در دوقطبی الکتریکی است. هنگامی که دوقطبی‌های مغناطیسی و الکتریکی با دامنه مساوی در فاز مناسب تحریک شوند، الگوی تشعشع در صفحات E و H به حالت قلبی و متقارن به دست می‌آید و تشعشع در پشت آنتن کاهش می‌یابد [۲۰].

² Frequency selective surface

¹ Huygens

عبد عزیز و همکارانش^۲ [۲۹] توضیح داده‌اند که عایق زمین شده را می‌توان به عنوان یک اندوکتانس L_d مدل‌سازی نمود. با این شرط که نسبت به طول موج عملیاتی، به لحاظ الکتریکی، کوچک باشد. بنابراین، امپدانس معادل سطح را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(۶) \quad z_s(\omega, \theta, \phi) = \frac{j\omega L_d(1-\omega^2 L_g C_g)}{1-\omega^2 C_g(L_g+L_d)}$$

در رابطه بالا $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای است. با جایگذاری در رابطه (۵)، دو فرکانسی که در آن‌ها قسمت موهومی ضریب بازتاب صفر می‌شود، به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$(۷) \quad f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C_g}}$$

$$(۸) \quad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C_g + L_d C_g}}$$

با جایگذاری فرکانس رابطه (۷) در معادلات (۵) و (۶)، ضریب انعکاس برابر با -1 می‌شود. اما با جایگذاری فرکانس رابطه (۸) در معادلات (۵) و (۶)، ضریب انعکاس برابر $+1$ می‌شود. از این‌رو، در فرکانسی برابر با مقدار به دست آمده در رابطه (۸)، آرایه سلول‌ها همانند یک بازتاب‌کننده AMC عمل می‌کند. توجه شود که ضریب انعکاس از AMC برابر با $+1$ است.

لازم به ذکر است که چالش اصلی در طراحی صفحه رسانای مغناطیسی مصنوعی در آنتن‌های دوقطبی مغناطیسی الکتریکی، پارامترهای C_g و L_g هستند [۳۰-۳۲].

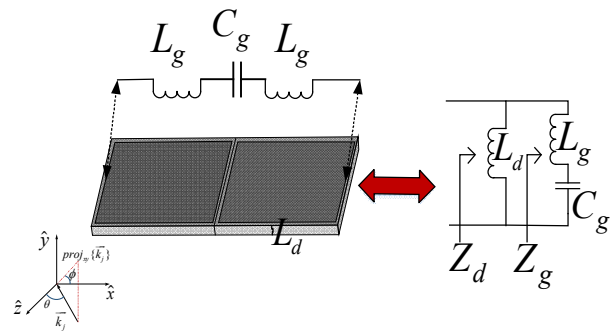
[۲۴]. این پدیده را می‌توان با استفاده از تئوری خط انتقال برای مدل‌سازی ساختار توضیح داد. ضریب انعکاس AMC برای یک موج صفحه‌ای تابشی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$(۵) \quad \Gamma(f, \theta, \phi) = \frac{z_s(f, \theta, \phi) - \eta_0}{z_s(f, \theta, \phi) + \eta_0}$$

که در آن η_0 امپدانس فضای آزاد و $z_s(f, \theta, \phi)$ امپدانس موثر ساختار که وابسته به فرکانس است. پارامترهای θ ، ϕ و \hat{f} به ترتیب قطبش، زاویه تابش و فرکانس موج تابش را نشان می‌دهند.

با توجه به اینکه دوره تناوب ساختار بسیار کوچک‌تر از طول موج عملیاتی است، امپدانس $z_s(f, \theta, \phi)$ را می‌توان به عنوان یک اتصال موازی بین امپدانس شبکه سلول‌ها و امپدانس عایق زمین شده، نشان داد [۲۵].

فاز ضریب انعکاس همواره در محدوده $\pm 180^\circ$ درجه تغییر می‌کند و در فرکانس تشدید، فاز ضریب انعکاس برابر با صفر درجه است. در طراحی AMCها، محدوده فرکانسی‌ای که اطراف فرکانس تشدید قرار گرفته و در آنها فاز ضریب انعکاس در محدوده $\pm 90^\circ$ قرار می‌گیرد، جزو پهنای باند عملکردی AMC محسوب می‌شوند [۲۶-۲۸].



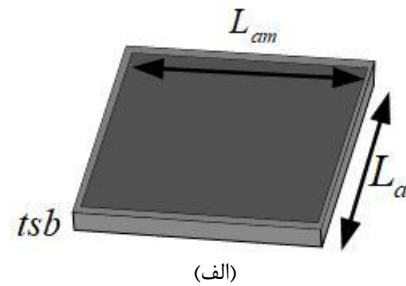
شکل (۲) مدار معادل رسانای مغناطیسی مصنوعی

رفتار رسانای مغناطیسی مصنوعی را می‌توان با استفاده از مدار معادل شکل ۲ توصیف کرد. این مدار از ترکیب سری اندوکتانس^۱ L_g و خازن C_g که با اندوکتانس L_d موازی شده‌اند، شکل گرفته است.

² Abd Aziz

¹ Inductance

شده در این رسانای مغناطیسی مصنوعی، زیرلایه راجرز^۱ RO4003 با ضریب عایقی $\epsilon_r = 3.55$ و تانژانت تلفات 0.0027 است. در شکل ۳-ب، فاز ضریب انعکاس موج تابشی به یک آرایه بی نهایت از سلول های شکل ۳-الف دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود، در فرکانس 3.5 GHz، فاز ضریب انعکاس برابر با صفر درجه است.

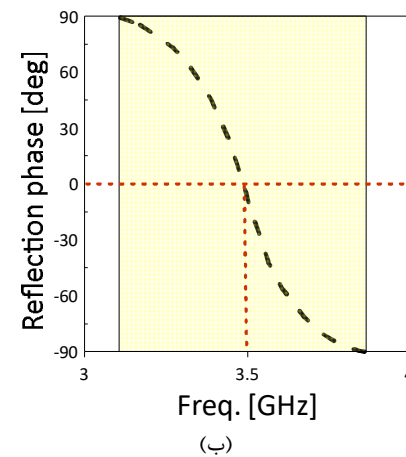


جدول ۱ جزئیات اندازه سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی

پارامتر اندازه	L_{am}	t_{sb}	L_a
	16.3	1	16.5

۳-۲ طراحی آنتن با قطبش خطی با استفاده از ساختار رسانای مصنوعی

ابعاد آنتن پیشنهادی در شکل ۴ و جزئیات اندازه آن در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۴-الف، دیواره های فلزی عمود به صفحه زمین نقش دو قطبی مغناطیسی را بازی کرده و دو صفحه افقی متقارن نقش دو قطبی الکتریکی را ایفا می کنند. ساختار تغذیه آنتن پیشنهادی به شکل Γ است. هندسه دو قطبی الکتریکی که همان صفحات افقی بالای آنتن است به گونه ای انتخاب شده که باعث افزایش پهنای باند امپدانس می شود. این کار با هم اندازه نبودن صفحه مربعی شکل بالایی در دو طرف صفحه عمودی یا همان دو قطبی مغناطیسی محقق می شود. همچنین اندازه کوچک تر صفحات دو قطبی مغناطیسی به صفحات دو قطبی الکتریکی و عرض کم خط تغذیه باعث بهبود نسبت پرتو جلو به پرتو عقب الگوی تشعشعی می شود. به طوری که نسبت جلو به عقب در نقطه بیشینه آن به 41 dB می رسد.



شکل (۳) (الف) سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی، (ب) نمودار فاز برگشتی سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی در باند فرکانسی 3.5GHz

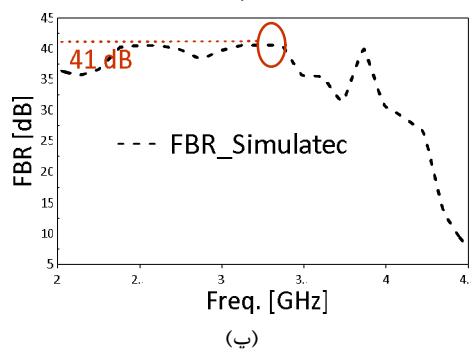
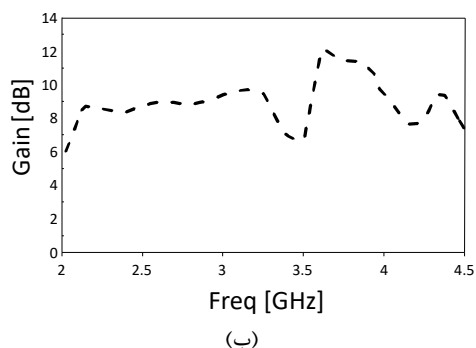
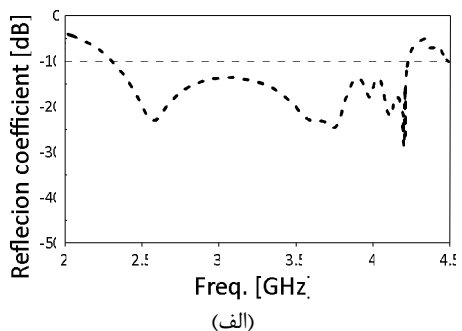
۳- بررسی آنتن با قطبش خطی

۱-۳ طراحی رسانای مغناطیسی مصنوعی در فرکانس 3.5 GHz

طراحی سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی در فرکانس 3.5 GHz انجام گرفته است. با جایگذاری یک آرایه ۷ در ۷ از سلول های (AMC) روی صفحه زمین آنتن، ارتفاع آنتن کاهش یافته است. لازم به ذکر است که هر چه تعداد سلول های رسانای مغناطیسی مصنوعی استفاده شده بیش تر باشد، ابعاد طول و عرض آنتن نیز بزرگ تر می شود، اما باعث عملکرد بهتر صفحه رسانای مغناطیسی مصنوعی می شود. تعداد سلول های رسانای مغناطیسی مصنوعی در این پژوهش به صورت تجربی به دست آمده است.

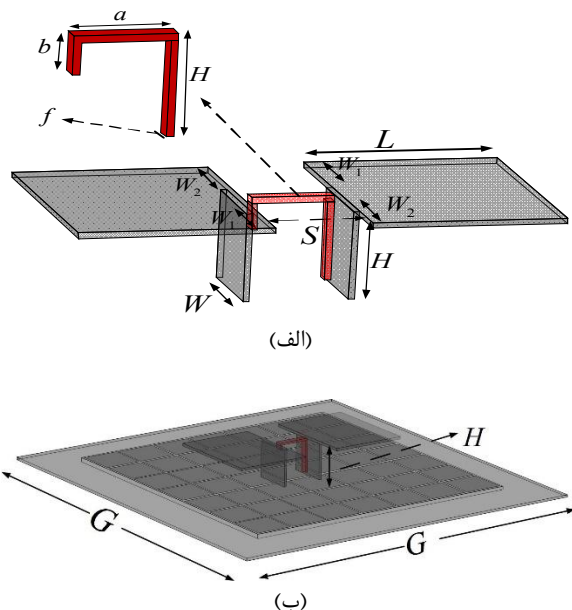
هندسره رسانای مغناطیسی مصنوعی استفاده شده در شکل ۳-الف نشان داده شده است. ابعاد آن نیز در جدول ۱ آمده است. زیرلایه استفاده

¹ Rogers



شکل (۵) (الف) نمودار ضریب انعکاس (ب) نمودار بهره (پ) نمودار نسبت پرتو جلو به پرتو عقب الگوی تشعشی

با توجه به نمودارهای شکل ۵، مقدار پهنای باند امپدانس 58.46% از فرکانس 2.3 GHz تا 4.2 GHz است. نقطه بیشینه بهره 12 dB در فرکانس 3.63 GHz است. همچنین نقطه بیشینه نسبت جلو به عقب برابر با 41 dB در فرکانس 3.4 GHz است.



شکل (۴) (الف) نمای دو قطبی مغناطیسی و الکتریکی و ساختار تغذیه (ب) نمای کلی آنتن با قطبش خطی به همراه صفحه رسانای مغناطیسی مصنوعی

جدول ۲ جزئیات اندازه آنتن با قطبش خطی (واحد: mm)

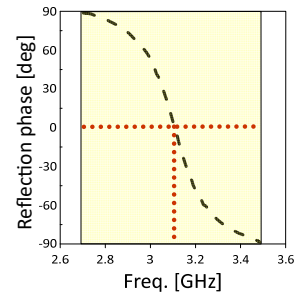
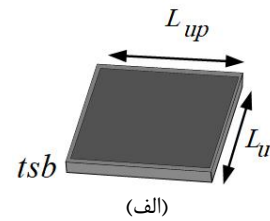
پارامتر	W_2	W_1	a	f	اندازه
اندازه	42	38.5	13.5	2.5	157.5
پارامتر	S	H	b	W	
اندازه	16.3	15	4.5	15.8	

۳-۳ نتایج شبیه‌سازی آنتن با قطبش خطی

برای طراحی و شبیه‌سازی آنتن پیشنهادی از نرم‌افزار CST Studio استفاده شده است. در شکل ۵، نمودارهای شبیه‌سازی ضریب انعکاس، بهره و نسبت پرتو جلو به پرتو عقب الگوی تشعشی برای آنتن پیشنهادی را مشاهده می‌کنیم.

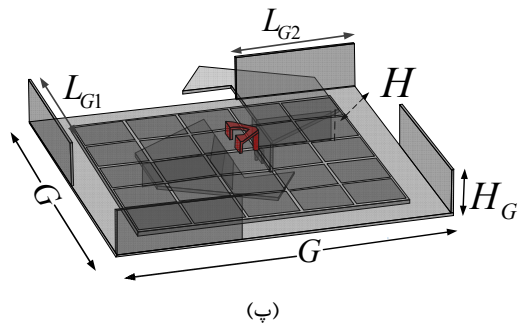
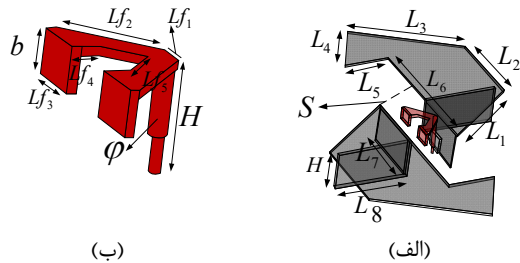
جدول ۳ جزئیات اندازه سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی

پارامتر	L_{up}	L_u	L_{sb}	L_{am}	L_m	L_{uv}
اندازه	20.8	19.8	1.6	104	31	26



۲-۴ طراحی آنتن با قطبش دایروی با استفاده از ساختار رسانای مصنوعی

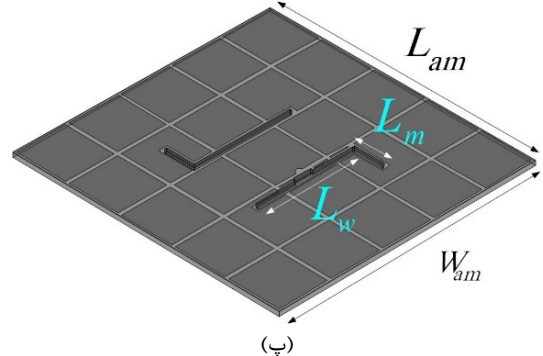
در این قسمت، آنتن با قطبش دایروی بر روی صفحه AMC قرار گرفته است. ابعاد آنتن پیشنهادی در شکل ۷ و جزئیات اندازه آن در جدول ۴ آورده شده است.



شکل (۷) (الف) نمای خط تغذیه (ب) نمای دو قطبی مغناطیسی و الکتریکی و ساختار تغذیه (پ) نمای کلی آنتن با قطبش دایروی به همراه صفحه رسانای مغناطیسی مصنوعی

جدول ۴ جزئیات اندازه آنتن با قطبش دایروی

پارامتر	H	S	H	H	G	
اندازه	14.5	28.6	14.5	130	85	
پارامتر	L1	L2	L3	L4	L5	L6
اندازه	40.6	32.5	46	25	19	63
پارامتر	L7	L8	LF1	LF2	Lf3	Lf4
اندازه	25	30	2.95	12.16	6.28	3.1
پارامتر	LF5	Ha	ψ	b	BW	Z
اندازه	5.36	13.4	2	4	8	1



شکل (۶) (الف) نمودار فاز برگشتی سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی در باند فرکانسی 3.1 GHz (ب) سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی (پ) آرایه ۵ در ۵ از سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی

۴- بررسی آنتن با قطبش دایروی

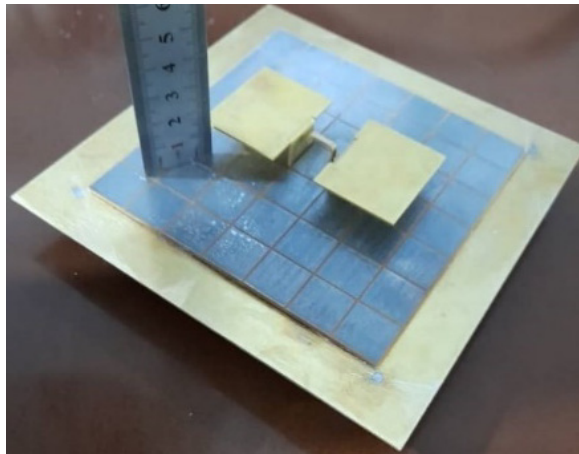
۴-۱ طراحی رسانای مغناطیسی مصنوعی در فرکانس 3.1 GHz

با جایگذاری صفحه (AMC) روی صفحه زمین آنتن، با استفاده از خاصیت بازتاب با فاز صفر رسانای مغناطیسی مصنوعی، کاهش ارتفاع آنتن محقق می‌شود. رسانای مغناطیسی مصنوعی استفاده شده، یک آرایه ۵ در ۵ از سلول‌های مربعی است. در شکل ۶، رسانای مغناطیسی مصنوعی استفاده شده در آنتن با قطبش دایروی، ارائه شده است. در جدول ۳، ابعاد AMC ذکر شده است. طراحی سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی، در فرکانس 3.1 GHz است.

۳-۴ نتایج شبیه‌سازی آنتن با قطبش دایروی

در شکل ۷، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضریب انعکاس، نسبت پرتو جلو به پرتو عقب الگوی تشعشعی (FBR^1)، نسبت محوری (AR) و بهره دیده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پهنای باند امیدانسی ۰.۲۵٪ از فرکانس 2.46 GHz تا 3.7GHz برای معیار $|S_{11}| \leq [-10dB]$ حاصل شده است. همچنین پهنای باند نسبت محوری ۰.۳۶٪ از فرکانس 2.57 GHz تا 3.49GHz برای معیار $AR < 3$ dB به دست آمده است.

حداکثر بهره قطبش دایروی دست راستی در آنتن پیشنهادی برای نمونه شبیه‌سازی شده، برابر با 9 dB در فرکانس 3.4 GHz است. بیشینه FBR آنتن پیشنهادی برابر با 27.2 dB است.



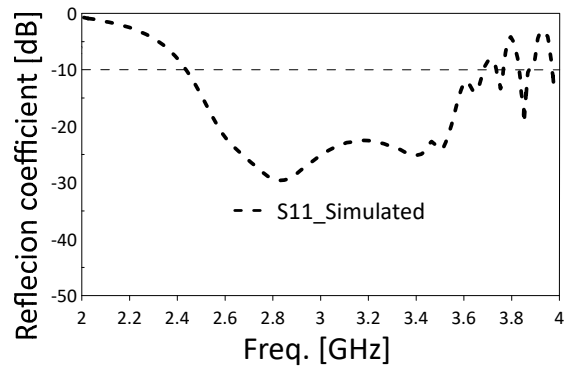
شکل (۹) نمونه ساخته شده آنتن پیشنهادی با قطبش خطی

۵- بحث و بررسی

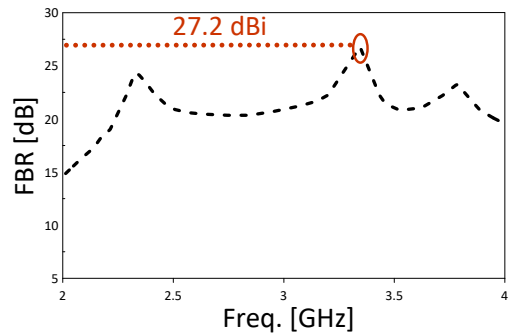
۵-۱ نتایج تجربی آنتن با قطبش خطی

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، یک نمونه آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش خطی و صفحه زمین AMC ساخته شده است. نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ضریب انعکاس و بهره آنتن با قطبش خطی ساخته شده، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در بازه فرکانسی 2-4.5 GHz برای آنتن پیشنهادی نشان می‌دهد که

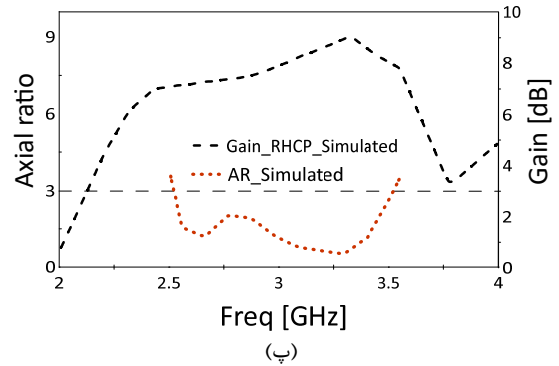
در شکل ۷-الف دیواره‌های عمودی به عنوان دوقطبی مغناطیسی و صفحات افقی متقارن با گوشه‌های مثلثی به عنوان یک دوقطبی الکتریکی ایفای نقش می‌کنند. در شکل ۷-ب، ساختار تغذیه جدید به شکل Y آورده شده است. در شکل ۷-پ، نمای کلی آنتن پیشنهادی ارائه شده است. صفحات پیرامونی عمود بر صفحه زمین در بهبود نمودار نسبت محوری (AR) که معیاری برای قطبش دایروی است، تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارند. همچنین در این شکل، یک مستطیل با طول و عرض BW نشان داده شده که در پایین خط تغذیه قرار می‌گیرد و منجر به تطبیق امیدانسی بهتر و پهنای باند امیدانسی عریض‌تر می‌شود.



(الف)



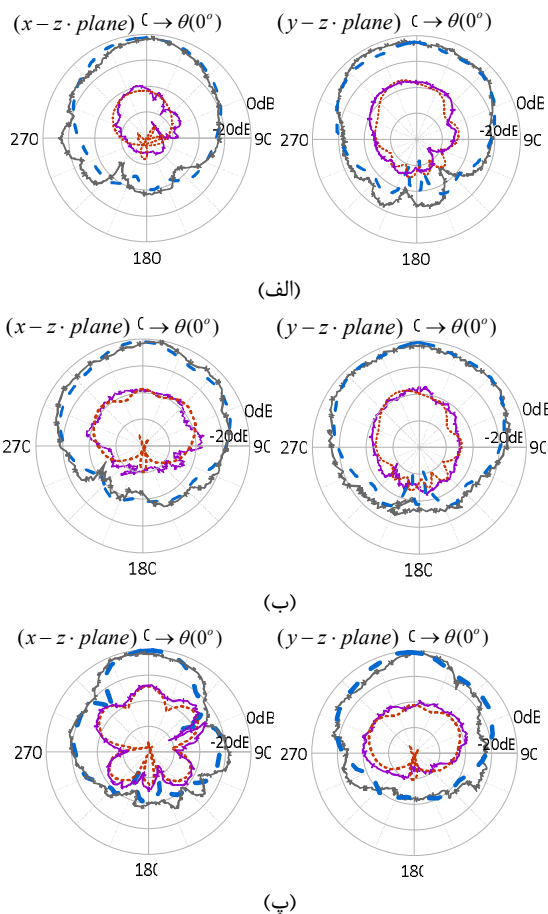
(ب)



شکل (۸) (الف) نمودار پهنای باند امیدانسی (ب) نمودار نسبت جلو به عقب (پ) نمودار بهره و نسبت محوری

¹ Front to back ratio

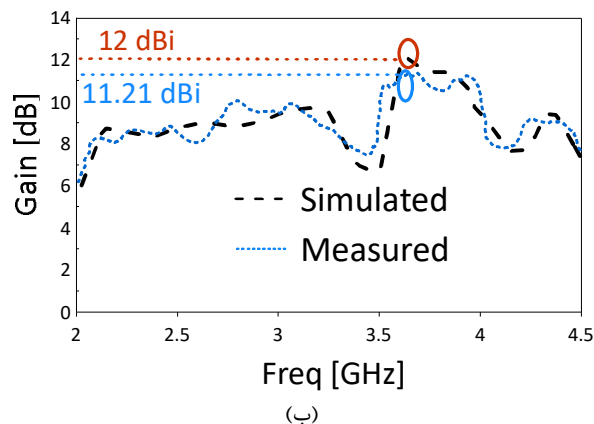
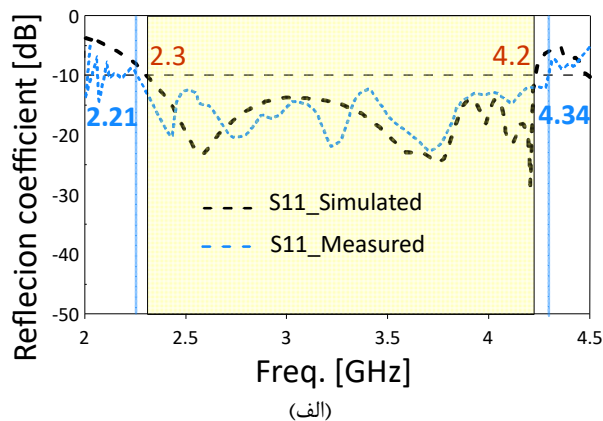
برخوردار است. همچنین اختلاف سطح حداقل 25 dB بین مولفه‌های اصلی و متقاطع تشعشع مشاهده می‌شود.



شکل (۱۱) الگوی تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن پیشنهادی در دو صفحه XZ و YZ در فرکانس‌های 2.5 GHz، 3.5 GHz و 4 GHz

در جدول ۵، آنتن پیشنهادی با نمونه‌های مشابه گزارش شده در مراجع مقایسه شده است. ارتفاع الکتریکی کم‌تر، بهره بالاتر و پهنای باند امپدانس عریض‌تر ساختار پیشنهادی در مقایسه با دو نمونه دیگر قابل ملاحظه است.

پهنای باند امپدانس برای مقادیر $|S_{11}| < [-10\text{dB}]$ برای نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی معادل 58.46% از فرکانس 2.3 GHz تا 4.2 GHz است و برای نمونه ساخته شده معادل 65.03% از فرکانس 2.21 GHz تا 4.34 GHz است. میزان بیشینه بهره برای مقادیر شبیه‌سازی شده در فرکانس 3.63 GHz برابر با 12 dB و بیشینه بهره برای نمونه ساخته شده در فرکانس 3.59 GHz برابر با 11.21 dB است. مقدار بیشینه نسبت پرتو جلو به پرتو عقب الگوی تشعشعی برابر با 41 dB در فرکانس 3.4 GHz است.



شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی شده و نمونه اندازه‌گیری شده برای آنتن با قطبش خطی (الف) نمودار پهنای باند امپدانس (ب) نمودار بهره

در شکل ۱۱، الگوی تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های 2.5 GHz، 3.5 GHz و 4 GHz نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، آنتن در همه فرکانس‌ها و در هر دو صفحه XZ و YZ از الگوی تشعشعی برودساید^۱

¹ Broadside radiation pattern

۵-۲ نتایج تجربی آنتن با قطبش دایروی

تصویر نمونه ساخته شده آنتن دوقطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش دایروی و صفحه زمین AMC در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. ابعاد ساختار در جدول ۴ فهرست شده است.

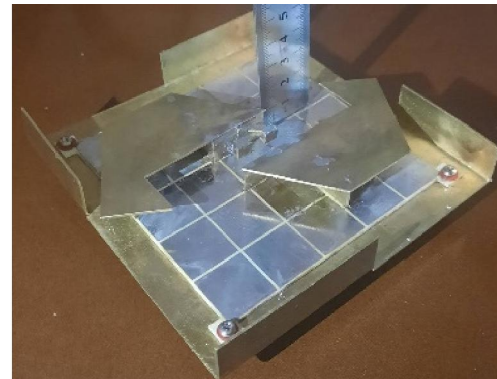
نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ضریب انعکاس، نسبت محوری و بهره آنتن نیز در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در شکل ۱۳-الف دیده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کمی با هم هم‌خوانی ندارند، هر چند فرکانس‌های شروع و انتهای باند یکسان هستند.

دلایل مختلفی می‌تواند برای ناهم‌خوانی بین نتایج شبیه‌سازی و تست آنتن ساخته شده وجود داشته باشد. در ادامه به برخی از این دلایل اشاره شده است. در فرایند ساخت آنتن، خطاهای ساختاری ممکن است رخ داده باشد که باعث تغییر در رفتار آنتن شود. این خطاها ممکن است شامل عدم صحیح بودن ابعاد، جابه‌جایی نامطلوب عناصر آنتن، چسباندگی نامطلوب قطعات و ... باشد. استفاده از مواد نامطلوب یا کم کیفیت در ساخت آنتن ممکن است به نقص‌های عملکرد منجر شود. به علاوه، تغییرات دمایی و رطوبت هوا نیز ممکن است تأثیرات جدید روی رفتار آنتن داشته باشند. در فرایند تست آنتن، خطاهای اندازه‌گیری ممکن است رخ دهد که باعث ناهم‌خوانی با نتایج شبیه‌سازی شود. این خطاها ممکن است شامل عدم دقت در اندازه‌گیری ابعاد و ویژگی‌های آنتن، عدم صحت تجهیزات اندازه‌گیری و ... باشد. محیط پیرامون آنتن نقش مهمی در رفتار آن بازی می‌کند. عوامل محیطی مانند وجود سایر آنتن‌ها، سطح نویز، تغذیه نامطلوب و ... ممکن است بر نتایج تست آنتن تأثیر بگذارد.

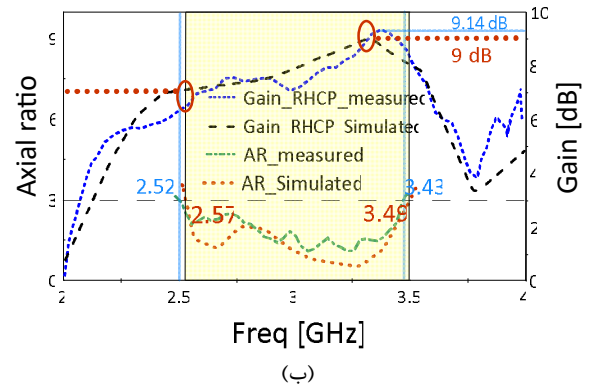
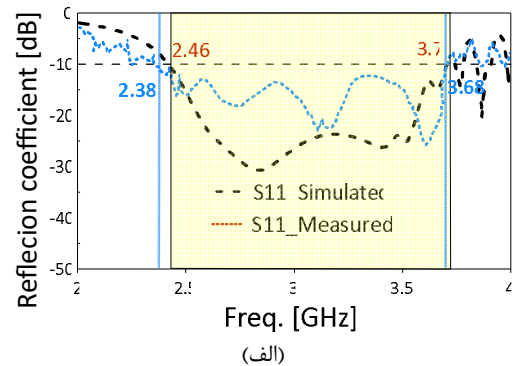
مقایسه مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن پیشنهادی نشان می‌دهد که پهنای باند امپدانس برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی برابر ۱.۲۴ GHz از فرکانس ۲.۴۶ GHz تا فرکانس ۳.۷ GHz (معادل درصدی ۴۰.۲۵٪) و برای نتایج حاصل از اندازه‌گیری برابر ۱.۳ GHz از فرکانس ۲.۳۸ GHz تا فرکانس ۳.۶۸ GHz (معادل درصدی ۴۴.۵۲٪) به دست آمده است. هم‌پوشانی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در بازه فرکانسی ۲.۴۶ GHz تا ۳.۷ GHz مشاهده می‌شود.

جدول ۵ مقایسه بین آنتن پیشنهادی با قطبش خطی با نمونه‌های ارائه شده در قبل

مرجع	اندازه (λ)	پهنای باند امپدانسی	بیشینه بهره (dBi)
[33]	$0.64 \times 0.48 \times 0.31$	42%	8
[34]	$1.748 \times 1.748 \times 0.59$	29.21%	13.5
کار حاضر	$1.7 \times 1.7 \times 0.16$	65.03%	11.21



شکل (۱۲) نمای ساخته شده آنتن با قطبش دایروی قرار گرفته روی صفحه رسانای مغناطیسی مصنوعی



شکل (۱۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن پیشنهادی با قطبش دایروی (الف) نمودار ضریب انعکاس (ب) نمودار بهره و نسبت محوری

در جدول ۶، مقایسه بین آنتن با قطبش دایروی پیشنهادی با دو نمونه دیگر گزارش شده در مراجع ارائه شده است. در مقایسه با کار ارائه شده توسط فنگ و همکاران [۳۵]، ارتفاع آنتن پیشنهادی کاهش قابل ملاحظه‌ای نداشته است، اما هر دو پهناى باند امیدانسی و نسبت محوری آنتن پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای عریض‌تر هستند. در مقایسه با کار ارائه شده توسط کو و همکاران [۳۶] نیز، کاهش بسیار قابل توجهی در ارتفاع آنتن اتفاق افتاده است.

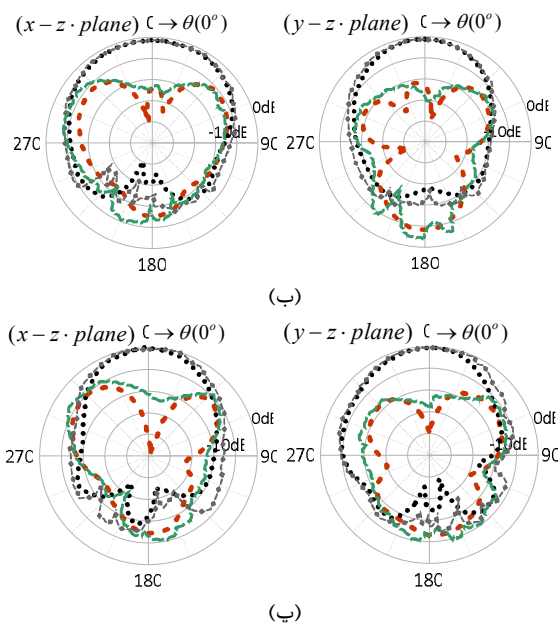
جدول ۶ مقایسه بین آنتن پیشنهادی با قطبش خطی با نمونه‌های ارائه شده در قبل

مرجع	اندازه (λ)	پهنای باند امیدانسی	پهنای باند نسبت محوری زیر 3 dB	بیشینه بهره (dBi)
[35]	$1.36 \times 1.36 \times 0.14$	24.2%	16.5%	-
[36]	$1.75 \times 1.75 \times 0.775$	54%	29.3%	11.45
کار حاضر	$1.33 \times 1.33 \times 0.13$	44.52%	30.58%	9.14

۶- نتیجه‌گیری

با به‌کارگیری ساختار رسانای مغناطیسی مصنوعی (AMC) بر روی صفحه زمین آنتن‌های دو قطبی مغناطیسی الکتریکی با قطبش‌های خطی و دایروی، کاهش ارتفاع قابل ملاحظه‌ای در آن‌ها اتفاق افتاده است.

در آنتن دوقطبی ME با قطبش خطی، یک آرایه ۷ در ۷ از سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی که در فرکانس 3.5 GHz دارای فاز ضریب انعکاس صفر است، به عنوان صفحه زمین آنتن استفاده شده است. با انجام این کار، ارتفاع آنتن از 0.25λ به 0.16λ کاهش یافته است. پهناى باندهای امیدانسی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نمونه ساخته شده به ترتیب ۵۸.۴۶٪ (فرکانس 2.3 GHz تا 4.2 GHz) و ۶۵.۰۳٪ (فرکانس 2.21 GHz تا فرکانس 4.34 GHz) هستند. بیشینه بهره شبیه‌سازی شده در فرکانس 3.63 GHz برابر با 12 dB و در نمونه ساخته شده در فرکانس 3.59 GHz برابر با 11.21 dB



شکل (۱۴) الگوهای تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن پیشنهادی با قطبش دایروی در فرکانس‌های 2.6GHz و 3.4GHz در دو صفحه YZ و XZ

پهناى باندهای نسبت محوری حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به ترتیب برابر با 0.92 GHz از فرکانس 2.57 GHz تا فرکانس 3.49 GHz (معادل درصدی ۳۰.۴۶٪) و 1.18 GHz از فرکانس 2.25 GHz تا فرکانس 3.43 GHz (معادل درصدی ۳۰.۵۸٪) است. حداکثر بهره قطبش دایروی دست راستی حاصل از شبیه‌سازی آنتن پیشنهادی برابر با 9 dB در فرکانس 3.4 GHz است. این مقدار برای نمونه اندازه‌گیری شده برابر با 9.14 dB و بیشینه آنتن پیشنهادی برابر با 27.2 dB است.

الگوهای تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن پیشنهادی با قطبش دایروی در فرکانس‌های 2.6 GHz و 3.4 GHz در دو صفحه YZ و XZ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. تمایز حداقل 25 dB بین مولفه‌های قطبش دایروی دست راستی و دست چپی در این الگوها مشهود است. همچنین در این دو فرکانس الگوهای تشعشعی برودساید هستند.

¹ Cao

GHz 5G Communication Systems," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 4, pp. 2061-2071, April 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3027042.

[4] S. Yan, P. J. Soh and G. A. E. Vandenbosch, "Wearable Dual-Band Magneto-Electric Dipole Antenna for WBAN/WLAN Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 9, pp. 4165-4169, Sept. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2443863.

[5] H. W. Lai and H. Wong, "Substrate Integrated Magneto-Electric Dipole Antenna for 5G Wi-Fi," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 2, pp. 870-874, Feb. 2015, doi: 10.1109/TAP.2014.2384015.

[6] B. Feng, J. Lai, Q. Zeng and K. L. Chung, "A Dual-Wideband and High Gain Magneto-Electric Dipole Antenna and Its 3D MIMO System With Metasurface for 5G/WiMAX/WLAN/X-Band Applications," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33387-33398, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2848476.

[7] B. Feng, K. L. Chung, J. Lai, and Q. Zeng, "A conformal magneto-electric dipole antenna with wide H-plane and band-notch radiation characteristics for sub-6-GHz 5G base-station," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 17469-17479, 2019.

[8] B. Feng, J. Chen, K. L. Chung, L. Wang and Y. Li, "Dual-Polarized Filtering Magneto-Electric Dipole Antenna Arrays With High Radiation-Suppression Index for 5G New Radio n258 Operations," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 4, pp. 3058-3063, April 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3121095.

[9] S. Fakhte, M. Zahir Joozdani, D. Zarifi, Magneto-electric Dipole Antenna for 5G. In: L. Matekovits, B.K. Kanaujia, J. Kishor, S.K. Gupta, (eds) Printed Antennas for 5G Networks. " *PoliTO Springer Series. Springer, Cham*. 2022. doi.org/10.1007/978-3-030-87605-0_5.

[10] A. -S. Kaddour, S. Bories, C. Delaveaud and A. Bellion, "Wideband dual-polarized magneto-electric miniaturization using capacitive loading," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 545-546, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072315.

است. همچنین مقدار بیشینه FBR آنتن پیشنهادی برابر با 41dB در فرکانس 3.4 GHz است.

در آنتن دوقطبی ME با قطبش دایروی، یک آرایه ۵ در ۵ از سلول رسانای مغناطیسی مصنوعی که در فرکانس 3.1 GHz دارای فاز ضریب انعکاس صفر است، به عنوان صفحه زمین آنتن استفاده شده است. با این کار، ارتفاع آنتن از 0.25λ به 0.13λ کاهش یافته است. پهنای باندهای امیدانسی حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نمونه ساخته شده به ترتیب 40.25% (فرکانس 2.46 GHz تا 3.7 GHz) و 44.52% (فرکانس 2.38 GHz تا فرکانس 3.68 GHz) هستند. پهنای باندهای نسبت محوری حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به ترتیب 30.36% (فرکانس 2.57 GHz تا فرکانس 3.49 GHz) و 30.58% (فرکانس 2.25 GHz تا فرکانس 3.43 GHz) هستند. حداکثر بهره قطبش دایروی دست راستی شبیه‌سازی شده در فرکانس 3.4 GHz برابر با 9 dB است. این مقدار برای نمونه اندازه‌گیری شده برابر با 9.14 dB و مقدار بیشینه FBR آنتن پیشنهادی برابر با 27.2 dB است. آنتن‌های پیشنهاد شده در این پژوهش گزینه‌های مناسبی برای اینترنت نسل پنجم موبایل زیر ۶ گیگاهرتز هستند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] J. Cao, H. Wang, S. Mou, P. Sothar and J. Zhou, "An Air Cavity-Fed Circularly Polarized Magneto-Electric Dipole Antenna Array With Gap Waveguide Technology for mm-Wave Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 9, pp. 6211-6216, Sept. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2925186.

[2] Y. Li and K. -M. Luk, "A 60-GHz Wideband Circularly Polarized Aperture-Coupled Magneto-Electric Dipole Antenna Array," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 4, pp. 1325-1333, April 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2537390.

[3] J. d. D. Ntawangaheza, L. Sun, Z. Xie, Y. Pang, Z. Zheng and G. Rushingabigwi, "A Single-Layer Low-Profile Broadband Metasurface Antenna Array for Sub-6

- magneto-electric dipole antenna for LTE femtocell base stations,” *Journal of Computational Electronics* 15, 200–209 2016. doi:[10.1007/s10825-015-0759-0](https://doi.org/10.1007/s10825-015-0759-0)
- [20] M. Li, & K.-M. Luk, Wideband Magneto-electric Dipole Antennas. In: Chen, Z. (eds) *Handbook of Antenna Technologies*. “Springer, Singapore, 2015, https://doi.org/10.1007/978-981-4560-75-7_49-1.
- [21] V.G.M. Annamdas, C.K. Soh, Contactless load monitoring in near-field with surface localized spoof plasmons—a new breed of metamaterials for health of engineering structures, *Sens. Actuators A Phys.* 244 (2016) 156–165, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.037>.
- [22] S. Papantonis, N.M. Ridler, S. Lucyszyn, Rectangular waveguide enabling technology using holey surfaces and wire media metamaterials, *Sens. Actuators A Phys.* 209 2014 1–8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.005>.
- [23] F. Capolino, *Theory and Phenomena of Metamaterials*. CRC Press. 2009. <https://doi.org/10.1201/9781420054262>
- [24] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4rd ed., John Wiley & Sons, 2009.
- [25] M.E. de Cos, F. Las-Heras, “On the advantages of loop-based unit-cell’s metallization regarding the angular stability of artificial magnetic conductors”, *Applied Physics A* 118 no. 2, 2014 699–708, doi:[10.1007/s00339-014-8782-8](https://doi.org/10.1007/s00339-014-8782-8)
- [26] D. Sievenpiper, Lijun Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999, doi: 10.1109/22.798001.
- [27] W.A.Goddard III, D.Brenner, S.E.Lyshevski, & G.J.Iafrate, . “Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology . *CRC Press*”. (2012). <https://doi.org/10.1201/9781315217178>
- [28] H.F. Álvarez, M.E. de Cos, S. García, F. Las-Heras, “Enhancing the angular stability of artificial magnetic conductors through lumped inductors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 272, Pages 223-230, ISSN 0924-4247, 2018 doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.026.
- [11] C.-Y. Shuai and G.-M. Wang, ‘Substrate-integrated low-profile unidirectional antenna’, *Antennas Propag. IET Microw.*, vol. 12, no. 2, pp. 185–189, 2018. doi.org/10.1049/iet-map.2017.0302
- [12] S. X. Ta and I. Park, "Dual-Band Low-Profile Crossed Asymmetric Dipole Antenna on Dual-Band AMC Surface," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 587-590, 2014, doi: 10.1109/LAWP.2014.2312950.
- [13] W. Wan, M. xue, L. Cao, T. Ye and Q. Wang, "Wideband Low-profile AMC-based Patch Antenna for 5G Antenna-in-package Application," *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, USA, 2020, pp. 1818-1823, doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00284.
- [14] J. d. D. Ntawangaheza, L. Sun, C. Yang, Y. Pang and G. Rushingabigwi, "Thin-Profile Wideband and High-Gain Microstrip Patch Antenna on a Modified AMC," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2518-2522, Dec. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2942056.
- [15] A. -S. Kaddour, S. Bories, C. Delaveaud and A. Bellion, "Wideband dual-polarized magneto-electric miniaturization using capacitive loading," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 545-546, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072315.
- [16] C.-Y. Shuai and G.-M. Wang, ‘Substrate-integrated low-profile unidirectional antenna’, *Antennas Propag. IET Microw.*, vol. 12, no. 2, pp. 185–189, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0302>
- [17] Y. -F. Cheng, J. Feng, C. Liao and X. Ding, "Analysis and Design of Wideband Low-RCS Wide-Scan Phased Array With AMC Ground," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 2, pp. 209-213, Feb. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2020.3044533.
- [18] T. Limpiti, , A. Chantaveerod, , & W. Petchakit, Design of a Magneto-Electric Dipole Antenna for FM Radio Broadcasting Base Station Antenna Implementation. *Progress In Electromagnetics Research M*, 60, 75–84. 2017. doi:[10.2528/PIERM17061906](https://doi.org/10.2528/PIERM17061906)
- [19] Govindanarayanan, I., Rangaswamy, N. & Anbazhagan, R. "Design and analysis of broadband



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

[29] M. Z. A. Abd. Aziz *et al.*, "Impedance modeling for a unit cell of the square loop frequency selective surface at 2.4 GHz," *2013 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, UK, 2013, pp. 161-166, doi: 10.1109/LAPC.2013.6711873.

[30] B. Hazarika, B. Basu, & A. Nandi, "Design of antennas using artificial magnetic conductor layer to improve gain, flexibility, and specific absorption rate," *Microwave and Optical Technology Letters*. 2020. doi:10.1002/mop.32531

[31] A. Salaheddine, A. Errkik, A. O. Dhaou Said, J. Zbitou, and A. Lakhssassi. "An Advanced Array Configuration Antenna Based on Mutual Coupling Reduction" *Electronics* 12, no. 7: 1707. 2023. doi.org/10.3390/electronics12071707

[32] H. Fernández Álvarez, M. E. de Cos and F. Las-Heras, "AMC's Angular Stability Improvement Through the Introduction of Lumped Components," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 813-816, May 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2817198.

[33] M. M. M. Ali, M. Al-Hasan, I. B. Mabrouk and T. A. Denidni, "Ultra-Wideband Hybrid Magneto-Electric Dielectric-Resonator Dipole Antenna Fed by a Printed RGW for Millimeter-Wave Applications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 2028-2036, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3139828.

[34] K. Huang and Y. Zhang, "Analysis and Design of Dual-Polarized Millimeter-Wave Filtering Magneto-Electric Dipole Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, doi: 10.1109/TAP.2023.3270717.

[35] B. Feng, J. Lai, K. L. Chung, T. -Y. Chen, Y. Liu and C. -Y. -D. Sim, "A Compact Wideband Circularly Polarized Magneto-Electric Dipole Antenna Array for 5G Millimeter-Wave Application," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 9, pp. 6838-6843, Sept. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2980368.

[36] W. Cao, X. Lv, Q. Wang, Y. Zhao and X. Yang, "Wideband Circularly Polarized Fabry-Perot Resonator Antenna in Ku-Band," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 586-590, April 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2896940.