

آنتن ریز نواری چاپی باند وسیع بارگذاری شده با ساختار AMC پهن باند برای سیستم‌های MIMO

حسین ملک‌پور و علی ابوالمعصومی

است، استفاده از یک بازتاب‌کننده مغناطیسی ساختگی (AMC) می‌باشد [۱۰] تا [۱۵]. این نوع ساختار اولین بار در سال ۱۹۹۹ ارائه شد [۱۰] و تا کنون به صورت گسترده در آنتن‌ها و ادوات الکترومغناطیسی استفاده شده است. این نوع ساختارها از یک شبکه متناوب تشکیل شده‌اند که بر روی یک لایه دی‌الکتریک قرار می‌گیرند و لایه دی‌الکتریک از قسمت زیرین زمین شده است. ویژگی منحصر به فرد این نوع ساختار در ضریب فاز بازتابی آن است. زمانی که ساختار در معرض تابش موج قرار می‌گیرد، در فرکانسی خاص ضریب فاز موج بازتابی صفر درجه است و باعث می‌شود این ساختار مشابه یک رسانای مغناطیسی عمل کند [۱۱]. طبق تحقیقات انجام شده در زمینه تئوری تصویر، هنگامی که المان به سطح نزدیک باشد، رسانای مغناطیسی کامل دارای عملکرد بهتری نسبت به رسانای الکتریکی کامل است. بنابراین ساختار AMC می‌تواند در فاصله کمتری از آنتن نسبت به رسانای الکتریکی، عملکرد بهتری داشته باشد که باعث افزایش جهت‌دهی آنتن، کوچک‌بودن ابعاد آن و بهبود عملکرد ادوات ریزموج شود [۱۶] تا [۲۰]. نتایج به دست آمده در [۱۶]، آرایه پهن باند با بارگذاری انواع سطوح AMC ماریچی را نشان می‌دهد. با توجه به پهنای باند کم اکثر سطوح AMC، دستیابی به ساختارهای پهن باند همواره مورد توجه قرار گرفته است [۲۱] تا [۲۹]. در [۲۹]، آنتن کم‌ضخامت پهن باند با صفحه زمین AMC پیشنهادی، پهنای باند امیدانسی $1.19 - 2.37$ GHz را به همراه افزایش بهره نشان می‌دهد. ضمناً با گسترش شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، استفاده از فناوری سیستم‌های چندین ورودی و چندین خروجی (MIMO) به عنوان راه حل مؤثری در بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت سیگنال مورد توجه قرار گرفته است [۳۰] تا [۳۸]. در این زمینه، آنتن‌های چاپی با تمرکز روی ارتقای خواص تشعشی و امیدانسی برای کاربرد سیستم‌های بی‌سیم و دسترسی نقاط نزدیک ارائه شده‌اند [۳۶] تا [۳۸].

آنتن طراحی شده در این مقاله شامل ساختار آنتن چاپی و سطح AMC مسطح متناوب است. طرح پیشنهادی از یک جفت آنتن چاپی تشکیل شده که المان چاپی اول از طریق تغذیه کوکاسیال مستقیماً تغذیه می‌شود و المان چاپی دوم توسط خط تغذیه E شکل در قسمت زیر تزویج می‌گردد. در قسمت AMC از یک ساختار جدید استفاده شده تا بر اساس خواص بازتابی در محدوده پهن باند عمل کند. این ساختار دارای ابعادی کوچک است به طوری که ابعاد آن در حدود $7 \times 62 \times 62$ mm می‌باشد و فضای کمی برای اختصاص به آنتن نیاز است. به دلیل خطی‌بودن قطبش آنتن‌ها، ساختار پیشنهادی دارای جداکنندگی مناسبی است. ساختار آنتن می‌تواند در بازه فرکانس $5.8 - 5.2$ GHz و 5.5 GHz WiMAX با تلفات بازگشتی پایین و الگوی تشعشی با جهت‌دهی مناسب کار کند که می‌تواند برای کاربردهای بی‌سیم مناسب باشد. ضمناً عملکرد آرایه‌ای از

چکیده: در این مقاله یک آنتن چاپی پهن باند روی سطح رسانای مغناطیسی ساختگی ارائه شده که می‌توان از آن در کاربردهای بی‌سیم مانند WLAN، WiMAX و سیستم‌های چندین ورودی و چندین خروجی (MIMO) استفاده کرد. در ساختار پیشنهادی، سطح رسانای مغناطیسی ساختگی (AMC) مسطح به عنوان صفحه زمین برای یک طرفه شدن الگوی این آنتن و افزایش پهنای باند امیدانسی استفاده شده است. طرح آنتن پیشنهادی از دو المان ریز نوار چاپی تغذیه شده به وسیله یک خط میکرواستریبی E شکل برای تزویج المان‌های چاپی تشکیل گردیده است. پهنای باند آنتن ساخته شده از 4.94 تا 6.9 گیگاهرتز در محدوده موج برگشتی حدود $10 - 1$ دسی‌بل برای قطبش خطی در باند C را شامل می‌شود. سلول واحد AMC لوزی شکل، پهنای باند 0.24 تا 7.15 گیگاهرتز برای فاز بازتابی $90 \pm$ درجه را نشان می‌دهد. با اضافه کردن سطح AMC به آنتن چاپی، یک ساختار پهن باند با کوچک‌سازی قابل قبول و افزایش بهره تا 7.25 dBi به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی خواص امیدانسی آنتن به وسیله نرم‌افزارهای تمام موج HFSS و CST انجام گرفته است. همچنین، آرایه دوالمانه از طرح پیشنهادی برای قطبش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده، پهنای باند کاری محدوده فرکانسی 5.18 تا 6.81 گیگاهرتز را در بر می‌گیرد و جداکنندگی بین عناصر آرایه کمتر از 22 dB است. به همین منظور، آرایه آنتن‌ها می‌تواند برای سیستم‌های MIMO مورد استفاده قرار گیرد.

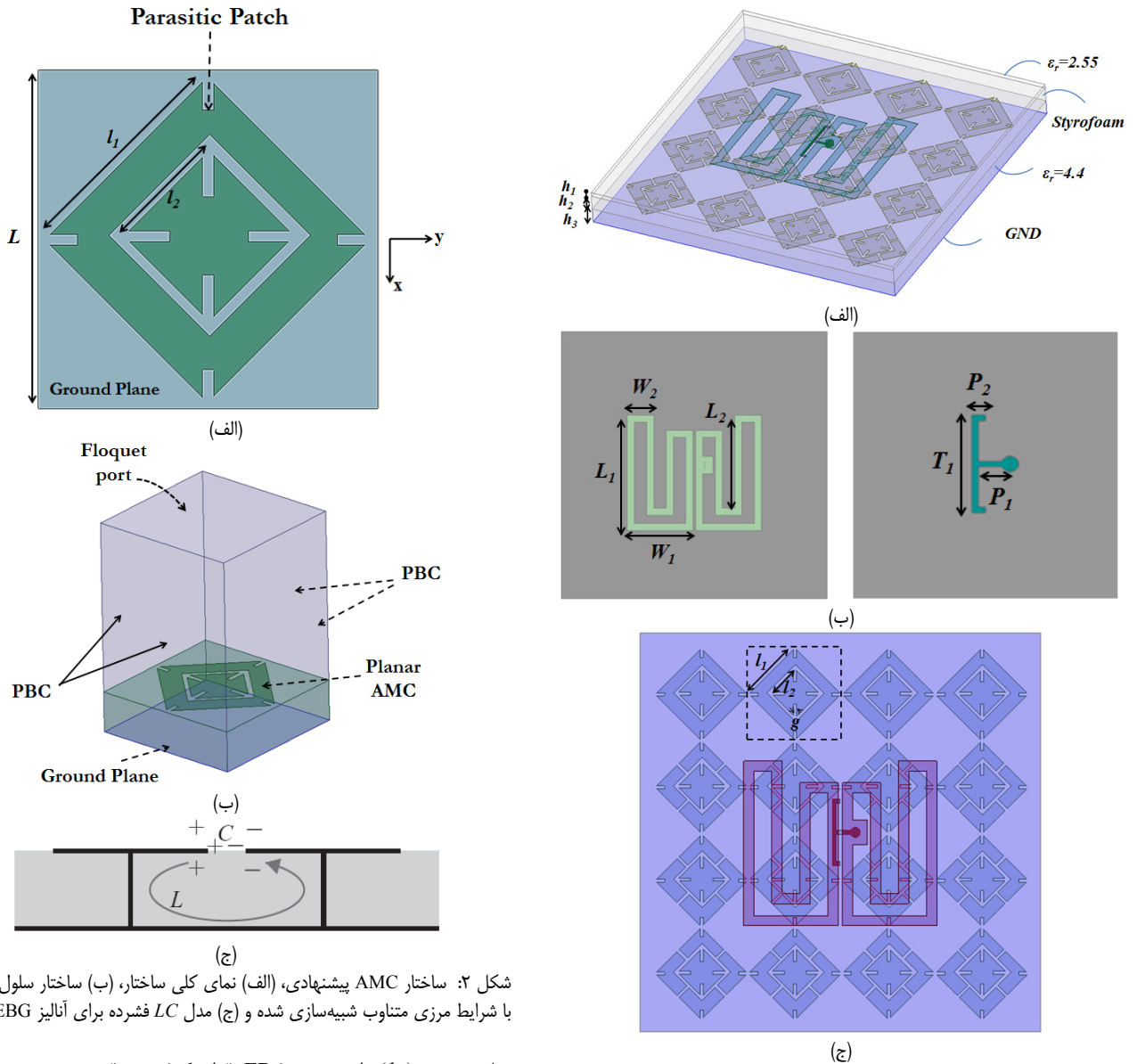
کلیدواژه: آنتن چاپی، رسانای مغناطیسی ساختگی (AMC)، پهن باند، WLAN، WiMAX.

۱- مقدمه

کاربردهای متعدد الکترومغناطیس و ظهور سیستم‌های پهن باند مستلزم طراحی تشعشع‌کننده‌های پهن باند است. استفاده از یک آنتن ساده، کوچک، سبک و اقتصادی برای کار در تمام بازه فرکانسی یک سیستم طراحی شده، بسیار مطلوب خواهد بود. یک گزینه مناسب برای این گونه آنتن‌ها، آنتن چاپی است. روش‌های مختلفی به منظور افزایش پهنای باند آنتن‌های چاپی ارائه شده است [۱] تا [۹]. از جمله این روش‌ها می‌توان به به کار بردن پهن‌های اتصال کوتاه [۳]، پیچ‌های E شکل و U شکل [۶] و [۷] و پیچ‌های پارازیتی و روی هم قرار داده شده [۸] و [۹] اشاره نمود. یکی از ایده‌هایی که برای افزایش پهنای باند آنتن‌های چاپی مطرح شده

این مقاله در تاریخ ۱۳ اسفند ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۱ آذر ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

حسین ملک‌پور (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، (email: h-malekpoor@araku.ac.ir).
علی ابوالمعصومی، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، (email: Ali.Abolmasoumi@gmail.com).



شکل ۲: ساختار AMC پیشنهادی، (الف) نمای کلی ساختار، (ب) ساختار سلول نامحدود با شرایط مرزی متناوب شبیه‌سازی شده و (ج) مدل LC فشرده برای آنالیز EBG.

میلی‌متری (h_r) از جنس FR۴ قرار گرفته و قسمت زیرین زیرلایه صفحه زمین قرار دارد. در شکل‌های ۱-ج و ۲ مشخصات مربوط به ساختار AMC قابل مشاهده است. فاصله بین قسمت‌های پارازیتی سلول (g) برابر با ۰٫۵ میلی‌متر است.

سلول واحد AMC ترسیم‌شده در شکل ۱-ج از پیچ‌های پارازیتی کوپل‌شده با پیچ مرکزی لوزی‌شکل تشکیل گردیده است. مشخصات الکتریکی و هندسی و پارامترهای تعیین‌کننده در پهنای باند ساختار AMC مسطح هستند. مشخصات الکتریکی، اثراتی همچون ضخامت پارازیتی خواهد بود و مشخصات الکتریکی، اثراتی همچون ضخامت زیرلایه و ثابت دی‌الکتریک زیرلایه را شامل می‌شود. ابعاد لوزی‌شکل قسمت AMC با دو متغیر l_1 و l_2 تعریف شده است. برای ایجاد فاز بازتابی صفر درجه در فرکانس مورد نظر، این دو متغیر در بازه‌های $l_1 = 10-13 \text{ mm}$ و $l_2 = 5-7 \text{ mm}$ تغییر داده شد و در مقادیر $l_1 = 10.5$ و $l_2 = 5.5$ جواب بهینه از لحاظ تلفات بازگشتی، برای آنتن حاصل گردید. در حالت کلی، یک سلول واحد AMC به وسیله تشدیدکننده LC موازی مدل و تعریف می‌شود. فرکانس تشدید، پهنای باند نسبی و امپدانس این تشدیدکننده معادل از روابط زیر محاسبه می‌شود

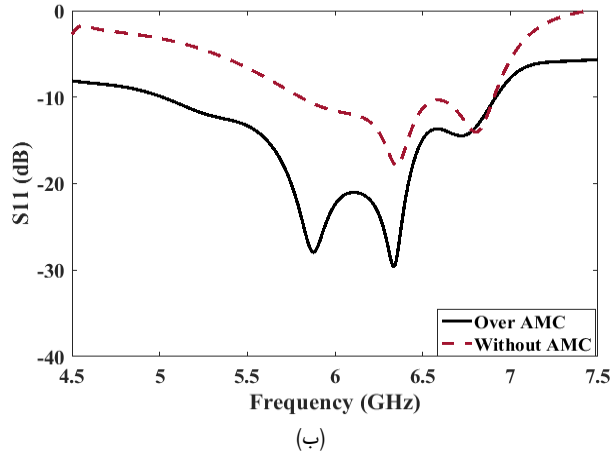
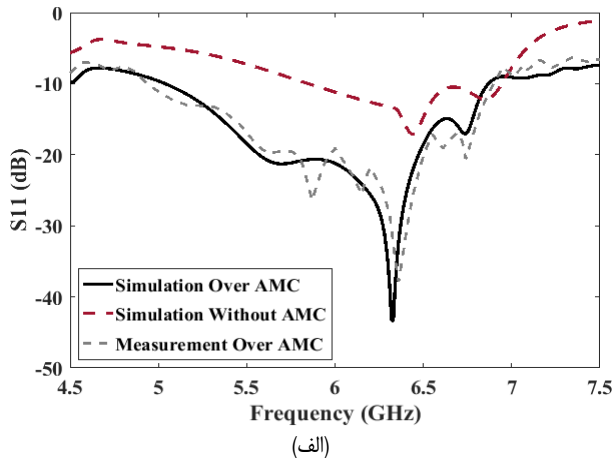
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (۱)$$

شکل ۱: پیکربندی آنتن و ساختار AMC مورد بررسی در مقاله، (الف) نمای کلی ساختار، (ب) نمای بالایی (شکل چپ) و زیرین (شکل راست) زیرلایه آنتن و (ج) نمای مربوط به ساختار AMC ($T_1 = 10.6 \text{ mm}$ ، $L_1 = 26.5 \text{ mm}$ ، $L_2 = 21.4 \text{ mm}$ ، $W_1 = 15.14 \text{ mm}$ و $W_2 = 6.11 \text{ mm}$ ، $P_1 = 3.13 \text{ mm}$ ، $P_2 = 1.28 \text{ mm}$).

این آنتن نیز برای قطبش‌های مختلف برای کاربرد سیستم‌های MIMO مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ساختار و عملکرد آنتن پیشنهادی

ساختار آنتن پیشنهادی از سه لایه آنتن چاپی، فوم پلی‌استرن و سطح AMC متناوب تشکیل شده است. مطابق شکل ۱-الف و ۱-ب در لایه بالایی، روی آنتن دو المان مربوط به آنتن چاپی قرار دارند و در قسمت زیرین آن خط تغذیه E شکل مربوط به تغذیه المان دوم قرار گرفته است. المان چاپی اول و خط E شکل به یک خط تغذیه هم‌محور بلند در محل تغذیه متصل گردیده است و المان دوم توسط خط تغذیه تزویج می‌شود. ساختار آنتن چاپی روی یک زیرلایه با ضخامت ۰٫۸ میلی‌متر (h_1)، ابعاد $62 \times 62 \text{ mm}^2$ و با ثابت دی‌الکتریک ۲٫۵۵ چاپ شده است. به منظور ایجاد فاصله بین آنتن و ساختار AMC از یک لایه ۳ میلی‌متری (h_2) فوم پلی‌استرن استفاده گردیده است. در قسمت زیرین آنتن یک ساختار AMC 4×4 قرار داده شده که این ساختار بر روی یک زیرلایه ۳



شکل ۵: نمودار ضریب بازتاب آنتن در حالات مختلف در نرم‌افزار (الف) HFSS و (ب) CST.

EBG به کار می‌رود. مطابق شکل ۲-ب، از تئوری فلوکه^۱ در شبیه‌سازی یک سلول واحد بی‌نهایت در ساختارهای متناوب استفاده شده است. دستیابی به خواص بازتابی یک سلول از روش عددی المان محدود (FEM) در شبیه‌ساز HFSS و تعریف شرایط مرزی متناوب (PBC) برای وجوه کناری صورت می‌گیرد. نمونه‌های پیاده‌سازی شده آنتن و سطح AMC در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

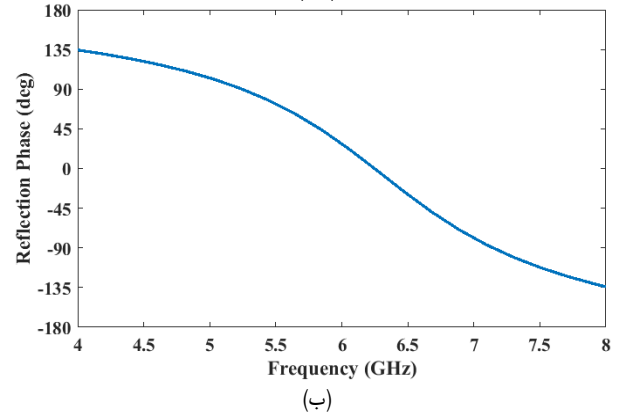
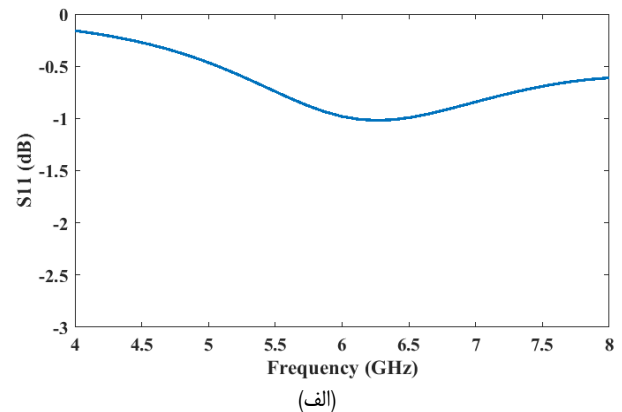
۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ساختار پیشنهادی

شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی در نرم‌افزارهای تمام موج HFSS و CST انجام شده است. در شکل ۴، تغییرات دامنه و فاز بازتابی سلول واحد پیشنهادی برای زاویه تابش عمودی در قطبش‌های متفاوت ۰ و ۹۰ درجه ترسیم شده است. این شبیه‌سازی به دلیل تقارن ساختار AMC برای امواج TE و TM دارای جواب یکسانی خواهد بود. بر همین اساس، پهنای باند AMC از ۹۰° تا ۹۰°، برای تابش عمودی محدوده فرکانسی ۷/۱۵-۵/۲۴ GHz را شامل می‌شود.

شکل ۵ ضریب بازتاب (S_{11}) مربوط به آنتن پیشنهادی بر روی ساختار AMC مسطح به وسیله نرم‌افزارهای HFSS و CST را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵-الف، پهنای باند اندازه‌گیری شده شامل محدوده فرکانسی ۶/۹۴-۶/۹۰ GHz (۳۳/۱٪) برای $S_{11} \leq -10$ dB می‌باشد. محدوده شبیه‌سازی شده برای پهنای باند امیدانسی در نرم‌افزار HFSS بر اساس روش المان محدود شامل ۵ تا ۶/۸۸ گیگاهرتز در محدوده موج برگشتی حدود ۱۰- دسی‌بل می‌باشد.



شکل ۳: نمونه‌های پیاده‌سازی شده آنتن و سطح AMC.



شکل ۴: نمودار دامنه و فاز بازتابی برای تابش عمودی سلول واحد پیشنهادی.

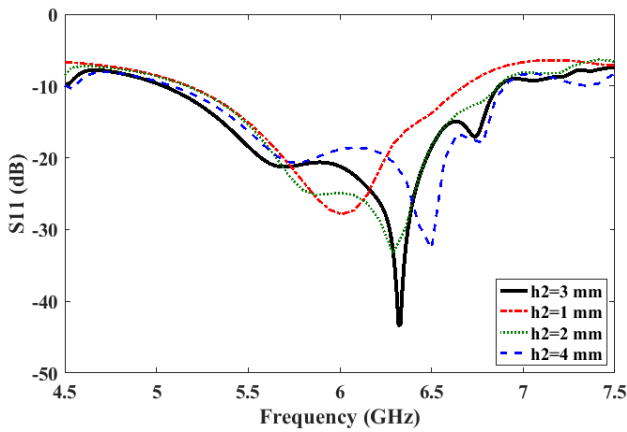
$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \tag{2}$$

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3}$$

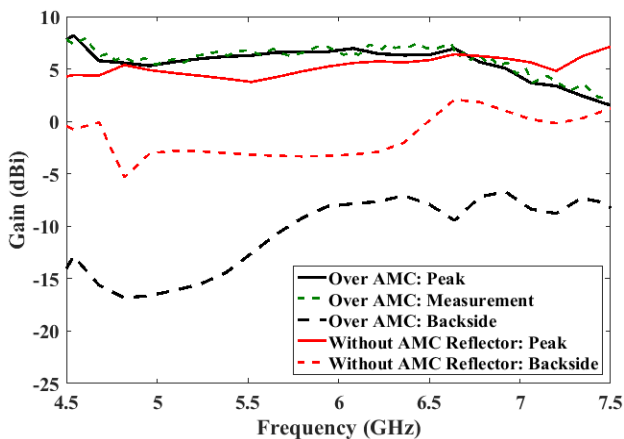
$$C = \frac{W\epsilon_r(1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \frac{W + g}{g} \tag{4}$$

$$L = \mu h \tag{5}$$

برای آنالیز ویژگی‌های یکتای ساختارهای EBG، روش‌های مختلفی به کار برده می‌شود [۶] که این روش‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (۱) مدل عنصر فشرده، (۲) روش خط انتقال متناوب و (۳) روش‌های عددی تمام موج. مدل عنصر فشرده ساده‌ترین روش آنالیز است که مطابق شکل ۲-ج، ساختار EBG را به صورت یک مدار رزونانسی LC توصیف می‌کند. مقادیر اندوکتانس L و خازن C به وسیله هندسه EBG تعیین می‌شوند و رفتار رزونانسی آن جهت توصیف خواص شکاف باند ساختار



شکل ۸: نمودار تغییرات ضریب بازتاب ورودی آنتن با تغییرات فاصله هوایی آنتن و ساختار AMC.



شکل ۹: نمودار بهره شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن در حالات مختلف.

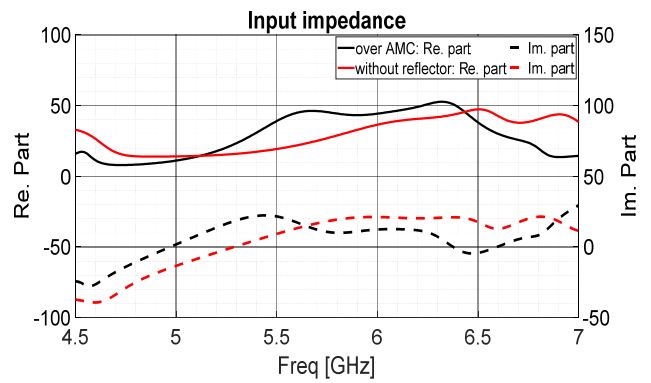
میلی‌متر است. با توجه به نزدیک بودن نمودار تلفات بازگشتی حالات ۳ و ۴ میلی‌متر، در فرکانس کاری WLAN و WiMAX، به منظور کوچک‌تر شدن ابعاد آنتن، فاصله ۳ میلی‌متر برای آنتن انتخاب شد. در بازه فرکانس کاری، تلفات بازگشتی کمتر از ۲۰- دسی‌بل است.

در شکل ۹ نمودار بهره در جهت عمود بر سطح و مؤلفه‌های میدان آنتن در حالات مختلف نشان داده شده است. ساختار AMC باعث کاهش تشعشع ناخواسته در قسمت زیر آنتن می‌شود و راندمان آنتن را نسبت به حالات PEC و بدون بازتاب‌کننده افزایش می‌دهد. آنتن بر روی ساختار AMC مسطح دارای ماکسیمم بهره اندازه‌گیری شده بیش از ۷٫۲۵ dBi در جهت تشعشع بین فرکانس ۵ تا ۶٫۹ گیگاهرتز می‌باشد که نسبت به ساختار بدون بازتاب‌کننده بهبود یافته و با بازتاب‌کننده PEC یکسان است ولی به دلیل کاهش تشعشعات نامطلوب، پهنای باند نیم نصف توان آن افزایش یافته است.

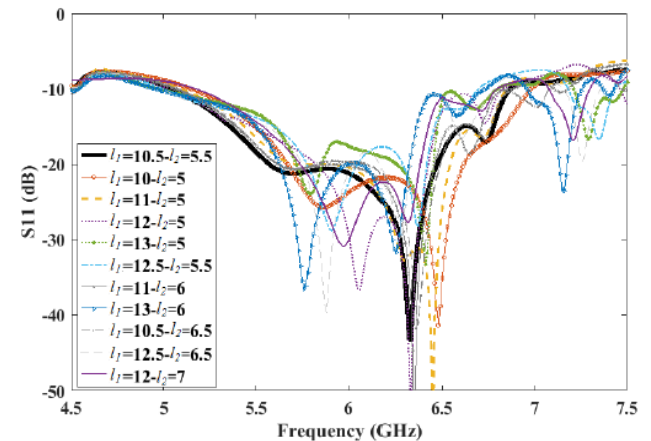
خط تغذیه E شکل در آنتن باعث افزایش تزویج بین دو المان چاپی شده و در نتیجه باعث تقارن پترن تشعشعی آنتن می‌گردد. با توجه به کاربرد آنتن در باند WiFi و WiMax، در شکل ۱۰ الگوی تشعشعی آنتن و همچنین میدان‌های تشعشعی الکتریکی در فرکانس‌های کاری ۵٫۸، ۵٫۵ و ۶ در دو صفحه E و H نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل الگوی تشعشعی در بازه‌های فرکانس کاری پایدار و با تغییرات جزئی است.

۴- آنتن آرایه پیشنهادی

آنتن طراحی شده را می‌توان برای دست‌یافتن به کارکرد سیستم‌های



شکل ۶: نمودار امپدانس ورودی آنتن در حالات مختلف.



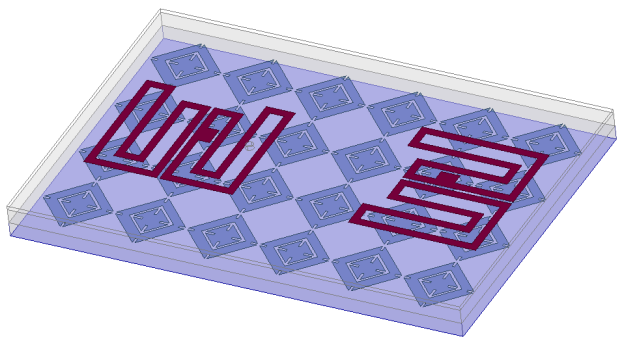
شکل ۷: نمودار تغییرات ضریب بازتاب ورودی آنتن با تغییرات l_1 و l_2 .

به طور مشابه، مطابق شکل ۵- ب نتیجه شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST محدوده ۵ تا ۶٫۹۲ گیگاهرتز را در بر می‌گیرد. با به کار بردن سطح AMC متناوب به عنوان بازتاب‌دهنده، تطبیق امپدانس در سرتاسر پهنای باند بهبود یافته و تا ۴۴- dB می‌رسد، در صورتی که تطبیق امپدانس در ساختار پیشنهادی بدون AMC به ۱۷- dB می‌رسد.

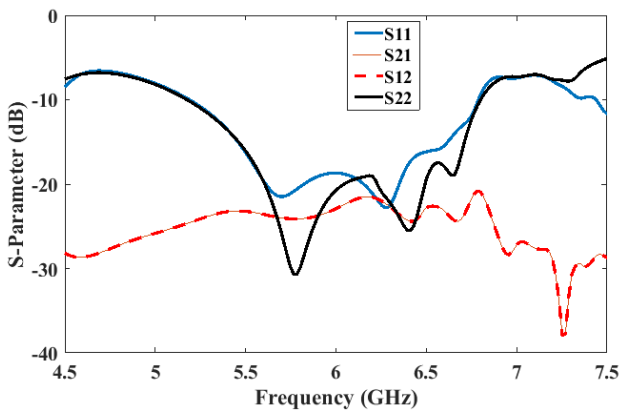
همچنین ساختار پیشنهادی بدون بازتاب‌دهنده به منظور نمایش اثر بازتاب‌کننده AMC با پهنای باند ۶٫۹۵-۵٫۸۵ GHz همراه شده است. با کاهش فرکانس کاری آنتن به فرکانس‌های پایین‌تر، کاهش اندازه قابل قبولی برای ساختار پیشنهادی با AMC در مقایسه با ساختار بدون AMC حاصل می‌شود. در شکل ۶ نمودار امپدانس ورودی در حالات مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار حقیقی امپدانس ورودی در حدود فرکانس ۵ گیگاهرتز نسبت به حالت بدون بازتاب‌دهنده به ۵۰ اهم نزدیک‌تر است. همچنین ساختار AMC باعث شده تا در محدوده فرکانس کاری اطراف ۶ گیگاهرتز، راکتانس ورودی نزدیک به صفر باشد. بنابراین در بازه فرکانسی کاری آنتن با اضافه شدن ساختار AMC به آنتن، مقاومت ورودی به ۵۰ اهم نزدیک‌تر شده که در مقایسه با حالات دیگر باعث افزایش پهنای باند آنتن می‌شود.

شکل ۷ ضریب بازتاب ورودی حاصل شده برای تغییرات l_1 و l_2 مربوط به ساختار AMC را در بازه‌های تعیین شده نشان می‌دهد. در حالت این حالت تلفات بازگشتی در بازه فرکانسی آنتن بیشتر از ۱۵ dB است و در اکثر محدوده فرکانس کاری بیشتر از ۲۰ dB می‌باشد.

شکل ۸ تغییرات ضریب بازتاب ورودی با تغییر فاصله هوایی بین ساختار AMC و آنتن را نشان می‌دهد. در فاصله ۳ میلی‌متر آنتن دارای پهنای باند بیشتر و تلفات بازگشتی کمتری نسبت به حالات ۱ و ۲



شکل ۱۱: پیکربندی آنتن در حالت آرایه دوالمانه.

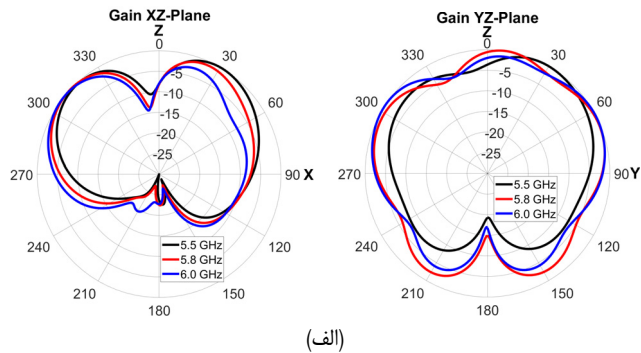


شکل ۱۲: ضرایب بازتاب آنتن در حالت آرایه دوالمانه.

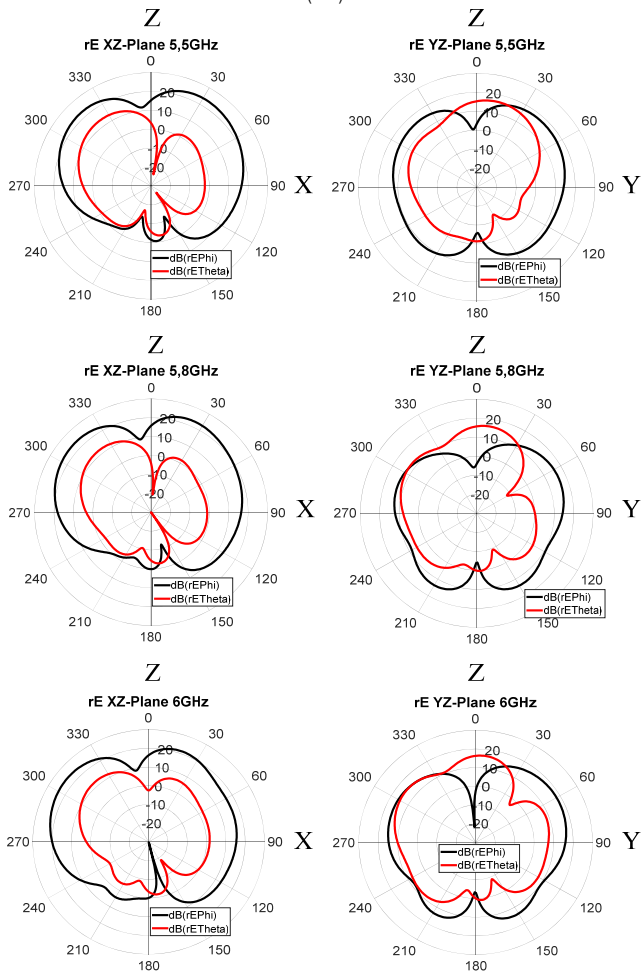
یک آنتن آرایه در ابعاد کوچک قابل قبول است.

حالات دیگر قرارگیری دو المان کنار یکدیگر نیز از لحاظ جداکنندگی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و نوع پیکربندی و نمودار جداکنندگی در شکل ۱۳ آورده شده است. از نمودار جداکنندگی به دست آمده در شکل ۱۳-ب نتیجه می‌شود در موقعیتی که دو المان به صورت عمودی قرار گرفته‌اند، به دلیل خطی بودن قطبش المان‌ها، کوپلینگ کمتری بین دو المان وجود دارد. همچنین هرچه فاصله دو المان از هم بیشتر شود، جداکنندگی بین دو المان بهتر خواهد شد. از نمودار جداکنندگی مشخص است در حالتی که دو المان به صورت عمود قرار گرفته‌اند، نسبت به حالت اول و سوم، جداکنندگی بهتری در فرکانس کاری دارد و قطبش کمتر را نشان می‌دهد. اما به دلیل خطی بودن قطبش هر المان، حالتی که دو المان به صورت عمود بر هم قرار دارند باعث ایجاد تنوع در قطبش آنتن آرایه می‌شود.

شکل ۱۴-الف و ۱۴-ب نمودار بهره نرمالیزه و میدان تشعشی الکتریکی آنتن آرایه را در فرکانس‌های کاری نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در حالت آرایه مقداری به تشعشعات نامطلوب در قسمت زیر آنتن افزوده شده است. به دلیل قطبش متعامد دو المان آرایه و جداکنندگی مناسب، پترن تقریباً جهتی بودن خود را حفظ کرده است. شکل ۱۴-ج نمودار بهره آنتن را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار آنتن در محدوده باند فرکانسی کاری، ماکسیمم بهره نزدیک به ۸٫۵ dB است و بازدهی بالایی به دست می‌آید که کارکرد خوب آنتن در حالت آرایه را نشان می‌دهد. در مقایسه با طرح پیشنهادی ارائه شده در [۳۴]، استفاده از ساختار AMC پیشنهادی منجر به بهره ماکسیمم بیشتر و تطبیق امپدانس مناسب‌تر شده است. در [۳۴]، ماکسیمم بهره بیش از ۷ dBi و حداقل تطبیق امپدانس به ۲۰ dB- می‌رسد. مطابق با شکل ۴-ب، طرح پیشنهادی AMC لوزی شکل در مقایسه با سلول واحد بیج مربعی ساده ارائه شده در [۳۴]، پهنای باند AMC بیشتری را نشان می‌دهد و بر همین اساس تطبیق



(الف)



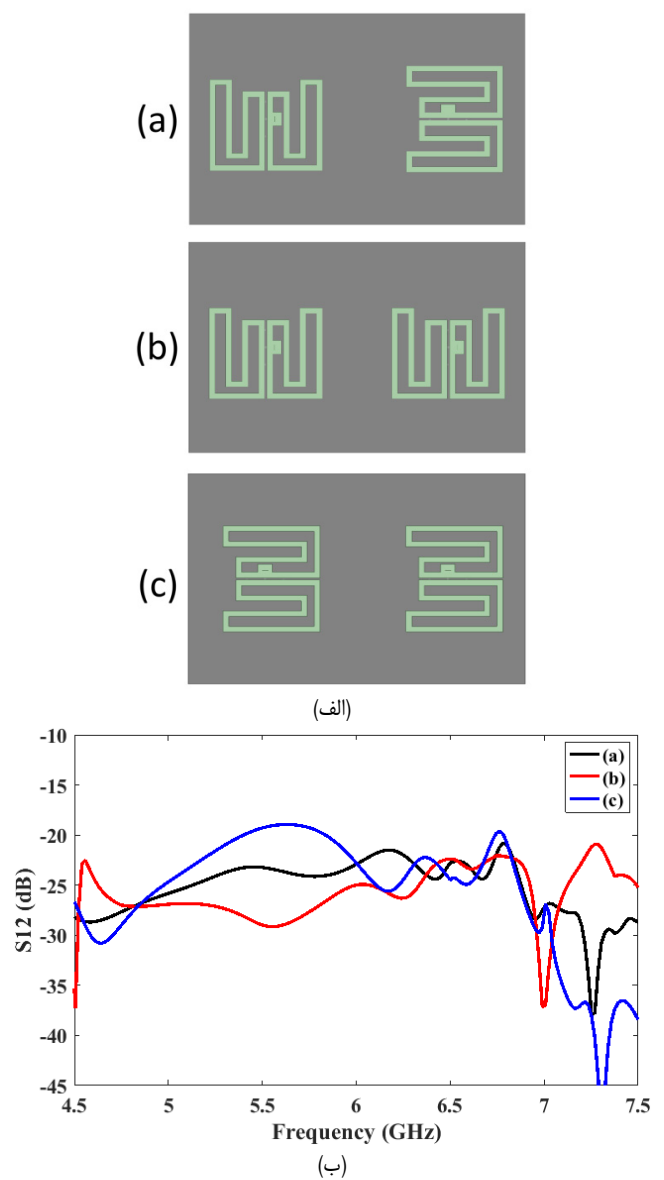
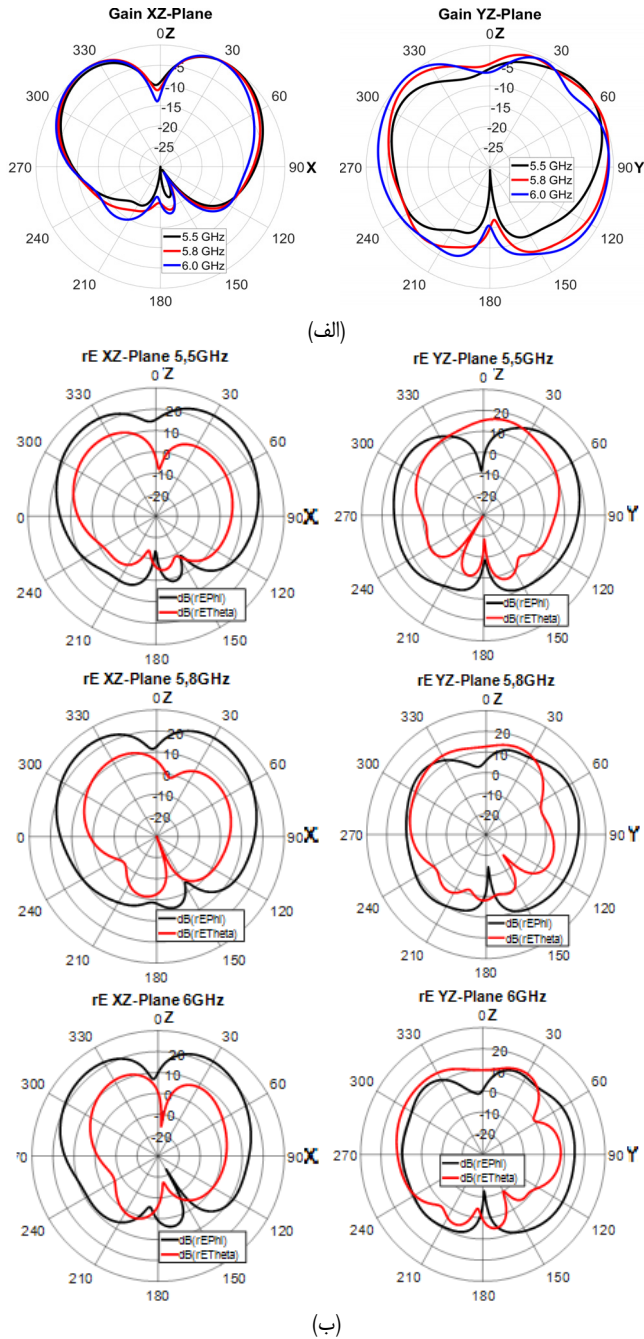
(ب)

شکل ۱۰: (الف) نمودار الگوی تشعشی بهره نرمالیزه آنتن بر روی ساختار AMC در فرکانس‌های ۵٫۵، ۵٫۸ و ۶ گیگاهرتز در صفحه E و H و (ب) نمودار الگوی تشعشی میدان E_θ و E_ϕ .

MIMO به صورت آرایه استفاده کرد. در ادامه آرایه دوالمانه آنتن طراحی شده از لحاظ بهره، جداکنندگی و ضرایب بازتاب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پیکربندی کلی آرایه دوالمانه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. به دلیل خطی بودن قطبش آنتن پیشنهادی، دو المان آنتن به صورتی قرار گرفته‌اند تا قطبش‌های مختلف در آرایه ایجاد شود. فاصله بین دو المان ۲۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده تا جداکنندگی مناسب بین دو المان به دست آید. ابعاد کلی آرایه دوالمانه برابر با $61 \times 92 \times 7 \text{ mm}^3$ است.

شکل ۱۲ نمودار ضرایب بازتاب برای آرایه را نشان می‌دهد. در بازه فرکانسی ۵٫۱۸ تا ۶٫۸۱ گیگاهرتز تلفات بازگشتی دو المان کمتر از ۱۰ dB است و آنتن می‌تواند در باند فرکانسی WiFi و WiMAX عمل کند. همچنین در این بازه جداکنندگی کمتر از ۲۲ dB است که برای

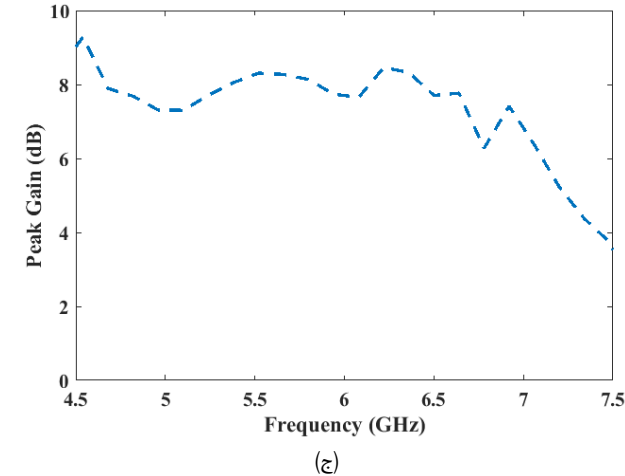


شکل ۱۳: (الف) پیکربندی آرایه دوآلمانه در حالات مختلف و (ب) نمودار جداکنندگی بین دو آرایه در هر حالت.

امپدانس آنتن بارگذاری شده وضعیت بهتری را نتیجه می‌دهد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله آنتن ریز نواری طراحی و پیاده‌سازی شد که پهنای باند آن از ۴٫۹۴ تا ۶٫۹ گیگاهرتز و موج برگشتی کمتر از ۱۰- دسی‌بل است. آنتن از دو بازوی المان چاپی تشکیل گردیده و برای تغذیه آن، از یک کابل هم‌محور متصل به بازوی اول استفاده شده و بازوی دوم توسط خط تغذیه E شکل تغذیه می‌شود. بهره کمینه این آنتن در نمونه ساخته‌شده بیش از ۷٫۲۵ دسی‌بل و در حالت آرایه دوآلمانه، حدود ۸٫۵ دسی‌بل است که برای آنتن چاپی بسیار مطلوب می‌باشد. برای یک‌طرفه شدن الگوی تشعشی این آنتن، بهبود عملکرد تشعشی و همچنین افزایش پهنای باند، یک ساختار AMC پهن‌بند به عنوان صفحه زمین به آنتن اضافه شده است. همچنین آنتن در حالت آرایه دوآلمانه مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت، پهنای باند امپدانس در محدوده ۵٫۱۸-۶٫۸۱ GHz با جداکنندگی و مشخصات تشعشی مطلوب و قطبش‌های متعامد برای استفاده در سیستم‌های MIMO حاصل می‌شود.



شکل ۱۴: (الف) پترن بهره نرمالیزه آنتن، (ب) الگوی تشعشی میدان الکتریکی و (ج) نمودار بهره.

مراجع

- [22] N. A. Abbasi and R. J. Langley, "Multiband-integrated antenna/artificial magnetic conductor," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 6, pp. 711-717, Apr. 2011.
- [23] Y. Zheng, J. Gao, X. Cao, Z. Yuan, and H. Yang, "Wideband RCS reduction of a microstrip antenna using artificial magnetic conductor structures," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 1582-1585, Oct. 2015.
- [24] M. E. de Cos, Y. Alvarez, and F. L. Heras, "Planar artificial magnetic conductor: design and characterization setup in the RFID SHF band," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 23, pp. 1467-1478, Mar. 2009.
- [25] H. Malekpoor, "Comparative investigation of reflection and band gap properties of finite periodic wideband artificial magnetic conductor surfaces for microwave circuits applications in X-band," *International J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 10, Article ID: e21874, Oct. 2019.
- [26] A. Foroozesh and L. Shafai, "Investigation into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beam shaping of low profile and conventional monopole antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 4-20, Jan. 2011.
- [27] W. Yang, H. Wang, W. Che, and J. Wang, "A wideband and high-gain edge-fed patch antenna and array using artificial magnetic conductor structures," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 769-772, Jun. 2013.
- [28] B. S. Cook and A. Shamim, "Flexible and compact AMC based antenna for telemedicine applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 524-531, Oct. 2013.
- [29] D. Feng, et al., "A broadband low-profile circular-polarized antenna on an AMC reflector," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 2840-2843, Sept. 2017.
- [30] S. Yan, P. J. Soh, M. Mercuri, D. Schreurs, and G. A. E. Vandenbosch, "Low profile dual-band antenna loaded with artificial magnetic conductor for indoor radar systems," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 9, no. 2, pp. 184-190, Mar. 2015.
- [31] J. Liu, J. Y. Li, J. J. Yang, Y. X. Qi, and R. Xu, "AMC-loaded low-profile circularly polarized reconfigurable antenna array," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 19, no. 7, pp. 1276-1280, Jul. 2020.
- [32] S. Rajagopal, G. Chennakesavan, D. R. P. Subburaj, R. Srinivasan, and A. Varadhan, "A dual polarized antenna on a novel broadband multilayer Artificial Magnetic Conductor backed surface for LTE/CDMA/GSM base station applications," *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, vol. 80, pp. 73-79, Oct. 2017.
- [33] S. Ghosh, T. N. Tran, and T. L. Ngoc, "Dual-layer EBG based miniaturized multi-element antenna for MIMO systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 8, pp. 3985-3997, Aug. 2014.
- [34] G. Li, H. Zhai, L. Li, C. Liang, R. Yu, and S. Liu, "AMC-loaded wideband base station antenna for indoor access point in MIMO system," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 2, pp. 525-533, Feb. 2015.
- [35] J. Y. Deng, J. Y. Li, L. Zhao, and L. X. Guo, "A dual-band inverted-F MIMO antenna with enhanced isolation for WLAN applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 2270-2273, Jun. 2017.
- [36] H. Malekpoor, A. Abolmasoumi, and M. Hamidkhani, "High gain, high isolation, and low-profile two-element MIMO array loaded by the Giuseppe Peano AMC reflector for wireless communication systems," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 16, no. 1, pp. 46-61, Jan. 2022.
- [37] Z. Xu and C. Deng, "High-isolated MIMO antenna design based on pattern diversity for 5G mobile terminals," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 467-471, Mar. 2020.
- [38] J. Zhu, S. Li, S. Liao, and Q. Xue, "Wideband low-profile highly isolated MIMO antenna with artificial magnetic conductor," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 458-462, Mar. 2018.
- [1] S. Jam and H. Malekpoor, "Analysis on wideband patch arrays using unequal arms with equivalent circuit model in X-band," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 1861-1864, 2016.
- [2] A. A. Roseline, K. Malathi, and A. K. Shrivastav, "Enhanced performance of a patch antenna using spiral-shaped electromagnetic bandgap structures for high-speed wireless networks," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 14, pp. 1750-1755, Nov. 2011.
- [3] H. Malekpoor and S. Jam, "Enhanced bandwidth of shorted patch antennas using folded-patch techniques," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 198-201, Feb. 2013.
- [4] H. Malekpoor and M. Hamidkhani, "Compact multi-band stacked circular patch antenna for wideband applications with enhanced gain," *Electromagnetics*, vol. 39, no. 4, pp. 241-253, Mar. 2019.
- [5] K. M. Mak, H. W. Lai, and K. M. Luk, "A 5G wideband patch antenna with antisymmetric L-shaped probe feeds," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 2, pp. 957-961, Nov. 2018.
- [6] H. Malekpoor and S. Jam, "Analysis on bandwidth enhancement of compact probe-fed patch antenna with equivalent transmission line model," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 9, no. 11, pp. 1136-1143, Aug. 2015.
- [7] S. Wang, et al., "Wideband shorted patch antenna with a modified half U-slot," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 689-692, Jun. 2012.
- [8] K. Klionovski and A. Shamim, "Physically connected stacked patch antenna design with 100% bandwidth," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 3208-3211, Nov. 2017.
- [9] H. Malekpoor and M. Hamidkhani, "Performance enhancement of low-profile wideband multi-element MIMO arrays backed by AMC surface for vehicular wireless communications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166206-166222, Dec. 2021.
- [10] H. Malekpoor and S. Jam, "Design, analysis, and modeling of miniaturized multi-band patch arrays using mushroom-type electromagnetic band gap structures," *International J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 1-13, Apr. 2018.
- [11] L. Yang, M. Fan, F. Chen, J. She, and Z. Feng, "A novel compact electromagnetic-bandgap (EBG) structure and its applications for microwave circuits," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 183-190, Jan. 2005.
- [12] R. C. Hadarig, M. E. de Cos, Y. Alvarez, and F. L. Heras, "Novel bow-tie antenna on artificial magnetic conductor for 5.8 GHz radio frequency identification tags usable with metallic objects," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 9, pp. 1097-1102, Dec. 2011.
- [13] A. Foroozesh and L. Shafai, "Effects of artificial magnetic conductors in the design of low-profile high-gain planar antennas with high-permittivity dielectric superstrate," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 10-13, Feb. 2009.
- [14] P. Prakash, M. P. Abegaonkar, A. Basuand, and S. K. Koul, "Gain enhancement of a CPW-fed monopole antenna using polarization-insensitive AMC structure," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1315-1318, Oct. 2013.
- [15] H. Malekpoor and S. Jam, "Improved radiation performance of low profile printed slot antenna using wideband planar AMC surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 11, pp. 4626-4638, Nov. 2016.
- [16] D. Nashaat, H. A. Elsadek, E. A. Abdallah, M. F. Iskander, and H. M. E. Hennawy, "Ultrawide bandwidth 2x2 microstrip patch array antenna using electromagnetic band-gap structure (EBG)," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 5, pp. 1528-1534, Nov. 2011.
- [17] S. Jam and H. Malekpoor, "Compact 1x4 patch antenna array by means of EBG structures with enhanced bandwidth," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 58, no. 12, pp. 2983-2989, May 2016.
- [18] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Low-profile dual-band textile antenna with artificial magnetic conductor plane," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 12, pp. 6487-6490, Dec. 2014.
- [19] E. Ameri, S. H. Esmaeli, and S. H. Sedighy, "Wide band radar cross section reduction by thin AMC structure," *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, vol. 93, pp. 150-153, Sept. 2018.
- [20] A. T. Almutawa and G. Mumcu, "Small artificial magnetic conductor backed log-periodic microstrip patch antenna," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 7, no. 14, pp. 1137-1144, Apr. 2013.
- [21] B. S. Cook and A. Shamim, "Utilizing wideband AMC structures for high-gain inkjet-printed antennas on lossy paper substrate," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 76-79, Jan. 2013.

حسین ملک‌پور تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه یزد و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مخابرات - میدان به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ از دانشگاه صنعتی شیراز به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مایکروویو، مخابرات بی‌سیم، آنتن، ساختارهای پرپودیک، آنتن‌های آرایه فازی و رادار.

علی ابوالمصومی در سال ۱۳۹۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه اراک دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۴۰۰ در مقطع کارشناسی ارشد مخابرات در دانشگاه تهران مشغول به تحصیل است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند آنتن و سیستم‌های مخابراتی است.