

طراحی یک ساختار فراماده پیشنهادی در باند فرکانسی موج میلی متری به منظور افزایش بهره یک آنتن سر-آتش

فرزاد خواجه خلیلی^۱، دانشجوی دکتری؛ محمد امین هنرور^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران - khalili.farzad@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران - amin.honarvar@pel.iaun.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک آنتن دوقطبی سر-آتش میکرواستریپ، با بهره بالا در باند فرکانسی موج میلی متری (۵۷-۶۴ GHz)، طراحی شده است. افزایش بهره آنتن، با مفهوم ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی، با استفاده از تیغه‌های متامتریالی پیشنهادی که در صفحه افقی آنتن دوقطبی تعبیه شده‌اند، حاصل گردیده است. هر یک از این تیغه‌ها، توسط یک تکسلولی جدید بارگذاری شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تمام‌موج، حاکی از این حقیقت است که طرح پیشنهادی، باعث بهبود بهره به میزان ۶/۲ dBi نسبت به نمونه اولیه آنتن دوقطبی بدون استفاده از ساختارهای متامتریالی گردیده است. در این ساختار، از تعداد ۲۸ تیغه متامتریالی از تکسلولی‌های پیشنهادی استفاده شده است. این تکسلولی‌ها، قابلیت ایجاد دو تشدید مغناطیسی را داشته که می‌توانند در راستای بهبود بهره در یک باند فرکانسی وسیع، نقش شایانی را ایفا نمایند. چگونگی تحقق این میزان افزایش بهره، وابسته به تعداد و چینش مناسب تیغه‌های متامتریالی در اطراف آنتن می‌باشد. استفاده از تیغه‌های متامتریالی پیشنهادی، علاوه بر جایگذاری روی صفحه افقی آنتن، در پایین آن نیز، به‌طور متقارن تعبیه شده است که این امر منجر به این مهم می‌شود که الگوی تشعشعی آنتن نچرخد و گلبزرگ اصلی آن، در راستای مطلوب، ثابت باقی بماند.

واژه‌های کلیدی: آنتن دو قطبی، سر-آتش، موج میلی متری، متامتریال، تکسلولی، بهره، الگوی تشعشعی.

Design of a Proposed Millimeter-Wave Metamaterial Structure to Increase the End-Fire Antenna Gain

F. Khajeh-Khalili¹, PhD Student; M. Honarvar², Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, E-mail: khalili.farzad@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, E-mail: amin.honarvar@pel.iaun.ac.ir

Abstract: In this article, an end-fire microstrip dipole antenna, with high gain and capability of operating in millimeter-wave frequency band (57-64 GHz) is designed. The high gain of the antenna, with concept of negative permeability is achieved by the proposed metamaterial slabs embedded in horizontal plane of the dipole antenna. Each slab is loaded by a novel unit-cell. The result of the full-wave simulation presents the fact that the proposed design, would cause a better gain of 6.2 dBi in comparison with conventional dipole antenna without using metamaterial structures. In this structure, 28 metamaterial slabs from proposed unit-cells are used. These unit-cells are capable of creating two magnetic resonances that can play an important role to improve the gain in a wide frequency band. How to achieve this gain enhancement, depends on the number and decoration of metamaterial slabs around the antenna. These proposed metamaterial slabs are placed on top of the horizontal plane of the antenna, and also on the bottom of the antenna plane. This would cause the main lobe to stay still to the desired direction.

Keywords: Dipole antenna, end-fire, millimeter-waves, metamaterial, unit-cell, gain, radiation pattern.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۲

نام نویسنده مسئول: محمدامین هنرور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - نجف آباد - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

باند فرکانسی غیر استاندارد ۶۰ GHz، یکی از باندهایی است که امروزه، جذابیت و کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. این باند، شامل بازه فرکانسی (۵۷-۶۴ GHz) می‌باشد که بیانگر یک باند فرکانسی وسیع است. علی‌رغم اهمیت و کاربردهای فراوانی که این باند فرکانسی پیدا کرده است، معایبی نیز دارد. برای نمونه، می‌توان به تلفات بسیار زیاد سیگنال‌ها در این باند، به دلیل جذب‌های اتمسفری اشاره نمود [۱]. اما از جمله مشخصه‌هایی که این باند فرکانسی را محبوب کرده است، می‌توان به تداخل کمتر بین سیگنال‌ها و همچنین، قابلیت استفاده دوباره از این باند فرکانسی، به‌طور گسترده و مشخص، اشاره نمود [۱]. استفاده از باند فرکانسی ۶۰ GHz، این نوید را می‌دهد که سرعت انتقال داده به بیش از ۱ Gb/s برسد. از طرفی، این قابلیت را نیز فراهم می‌سازد که سیستم‌هایی با ابعاد بسیار کوچک را طراحی نمود. اگرچه کارکردن در فرکانس ۶۰ GHz، مشکل مواجه‌شدن با تلفات بسیار زیاد را موجب می‌شود؛ اما، قابلیت افزایش بهره آنتن به‌طور چشم‌گیر، مهم‌ترین دلیل علاقه پژوهشگران به این باند فرکانسی می‌باشد [۲]. از آنجایی که بهره یک آنتن، رابطه معکوس با پهنای گلبیگ اصلی آن دارد، برای تحقق آنتن‌هایی با بهره بالا، بایستی پهنای گلبیگ اصلی آن‌ها، الزاماً باریک باشد [۳]. همین خاصیت، باعث کاهش تداخل و اثرات منفی چند مسیری می‌شود. اما در بسیاری از موارد، بحث پهنای گلبیگ اصلی، مثلاً در سیستم‌های فرستنده و گیرنده‌ای که محل گیرنده ثابت نمی‌باشد، یک مسئله مهم و حیاتی است. گلبیگ اصلی یک آنتن که عملاً میزان تشعشع را معنا می‌بخشد، معمولاً توسط روش‌های گوناگونی نظیر استفاده از آنتن‌های لنزی در فرکانس‌های موج میلی‌متری هدایت و کنترل می‌شود [۴]. از طرفی، بحث افزایش بهره آنتن نیز در طی سالیان اخیر، با روش‌های مختلف ابتکاری همراه بوده است. از جمله این روش‌ها، می‌توان به استفاده از پچ‌های انگلی^۱ و یا استفاده از ساختارهای موجبر مجتمع زیرلایه^۲ اشاره نمود [۵، ۶]. اما دستاورد استفاده از این روش‌ها، طراحی یک آنتن با ابعاد بسیار بزرگ می‌باشد.

در مرجع [۷]، یک آنتن با قابلیت شکل‌دهی گلبیگ یک و دوبعدی، به‌منظور عملکرد در فرکانس ۳۰ GHz طراحی شده است. در این طرح، از ساختارهای موجبر مجتمع زیرلایه، با ادغام کردن چندین تزویجگر و جابه‌جاکننده فاز به‌منظور مهیا کردن بهره‌ای در حدود ۸/۵ dBi استفاده شده است. اما استفاده از تزویجگر ۸ دهانه‌ای، باعث افزایش ابعاد ساختار به‌طور کاملاً مشهود شده است. در مرجع [۸]، یک آنتن با قابلیت شکل‌دهی گلبیگ دوبعدی، با استفاده از چندین جابه‌جاکننده فاز موجبری، به‌همراه آنتن آرایه‌ای حلقه‌ای، معرفی شده است. اما، روش استفاده‌شده در این مرجع، قابلیت شکل‌دهی گلبیگ اصلی در دو صفحه افقی و عمودی حتی به‌اندازه ۲۰ درجه را نیز دارا نمی‌باشد. از طرفی، این طرح، بر روی یک بستر چندلایه‌ای پیاده‌سازی شده است که همین امر، باعث افزایش پیچیدگی طراحی و ساخت

می‌شود. این آنتن، به‌ترتیب بهره و بازدهی‌ای معادل ۸/۵ dBi و ۷۰٪ را فراهم می‌سازد. آنتن‌های وقفی و همچنین، آنتن‌های آرایه‌فازی نیز برای هدایت گلبیگ اصلی به‌سوی راستای دلخواه و نیز، به‌منظور افزایش بهره، در مراجع [۹، ۱۰] ارائه شده است. اما روش‌های معرفی‌شده در این مراجع، به‌دلیل لزوم استفاده از چندین آنتن متفاوت در ساختار، تماماً منجر به افزایش تلفات و همچنین، افزایش ابعاد ساختار و در نتیجه، افزایش هزینه ساخت می‌شود.

در طی دو دهه اخیر، ساختارهای مصنوعی ماتمتریال^۳، به‌طور گسترده در طراحی ادوات و قطعات مخابراتی، کاربرد پیدا کرده‌اند. نمونه صفحه‌ای این ساختارها، برای نخستین‌بار در مرجع [۱۱] معرفی گردید. این ساختارها، به‌علت منفی‌بودن ضرایب نفوذپذیری الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی آن‌ها، دارای خواص الکترومغناطیسی ویژه‌ای هستند. ساختارهای SRR^۴ و CSRR^۵ که نخستین بار توسط پندری معرفی گردید، به‌دلیل ابعاد الکتریکی کوچک، ساختارهایی مناسب به‌منظور تحقق محیط‌های ماتمتریالی می‌باشند [۱۲]. لذا، این ساختارها، به‌طور گسترده در طراحی قطعات مایکروویوی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نکته بسیار مهم، آن است که استفاده از این ساختارها، علاوه بر تمامی مزایای اشاره‌شده در بالا، قابلیت افزایش بهره آنتن‌های مایکرواستریپ را نیز به‌طور بالقوه دارند. اخیراً، به‌طور کاملاً چشم‌گیر، استفاده از ساختارهای ماتمتریالی در طراحی آنتن‌ها، گسترش یافته است [۱۳-۲۳]. برای بیان دقیق‌تر و ارائه یک دسته‌بندی کلی، ساختارهای ماتمتریالی پیشنهادی در مقالات که منجر به افزایش بهره شده‌اند، به سه نوع ساختارهای با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی [۱۳-۱۶]، ساختارهای با ضریب نفوذپذیری الکتریکی منفی [۱۸-۲۲] و ساختارهای الکترومغناطیسی با باند شکاف [۱۷، ۲۳]، افراز می‌گردند. لازم به ذکر است که ساختارهای مبتنی بر SRR، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی و ساختارهای مبتنی بر CSRR، ضریب نفوذپذیری الکتریکی منفی ایجاد می‌نمایند. به‌عنوان مثال، در مرجع [۱۳]، یک آنتن پهن باند با استفاده از ساختارهای ماتمتریالی متداول و مرسوم SRR با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی، ساخته شده است. در این طرح، آنتن اولیه، توسط آرایه‌ای با چهار عنصر ماتمتریالی، بارگذاری شده که همین امر، باعث بهبود بهره به‌اندازه ۴-۱/۳ dB در بازه فرکانسی ۵/۱-۸/۲ GHz شده است. در مرجع [۱۴]، یک ساختار آنتنی چندورودی-چندخروجی مایکرواستریپی به‌کمک لنزهای ماتمتریالی بارگذاری‌شده با SRR های بهبودیافته معرفی شده است. این ساختار ماتمتریالی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی در فرکانس کار ایجاد می‌نماید. در این طرح، مزیت اصلی استفاده از ساختارهای ماتمتریال در آنتن پیشنهادی، کاهش تزویج متقابل^۶ ساختار می‌باشد. همچنین، تحقق ساختار کوچک و بهبود بهره نیز، در این طرح به‌وضوح مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که در این مقاله، نشان داده شده است که لنزهای ماتمتریالی، می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای لنزهای عایقی به‌منظور افزایش بهره آنتن‌های

نفوذپذیری مغناطیسی منفی را بر عهده دارند، پرداخته می‌شود. ساختار تک‌سلولی پیشنهادی، با ایجاد دو تشدید مغناطیسی و به تبع آن، ایجاد یک محیط ماتمتریالی با پهنای باند وسیع، می‌تواند بهره آنتن را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهد. در بخش ۳، سازوکار و چگونگی تحقق افزایش بهره آنتن ارائه می‌گردد. آنتن استفاده‌شده در این ساختار، آنتن سر-آتش معرفی‌شده در مرجع [۲۴] می‌باشد. از این آنتن‌ها، به‌منظور عملکرد در فرکانس‌های کمتر از ۱ GHz تا باند فرکانسی موج میلی‌متری، استفاده می‌گردد [۲۵]. در این مقاله، ابعاد آنتن معرفی‌شده در مرجع [۲۴]، برای عملکرد در باند فرکانسی WiGig/IEEE 802.11ad (۵۷-۶۴ GHz) بهینه شده است. سپس، از تعداد ۲۸ تیغه ماتمتریالی بارگذاری‌شده توسط آرایه‌های TSPM در صفحه افقی این آنتن به‌منظور افزایش بهره، استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار طراحی‌شده نشان می‌دهد، بیشینه بهره ساختار در فرکانس مرکزی ۶۰ GHz، برابر ۱۱/۶ dBi و بازدهی تشعشع نیز برابر ۸۸٪ می‌باشد. همچنین، ابعاد آنتن برابر $25\text{mm} \times 4\text{mm} \times 18\text{mm}$ بوده که معادل $0.6\lambda \times 0.1\lambda \times 0.4\lambda$ است. در این رابطه، λ برابر طول موج در فرکانس مرکزی ۶۰ GHz است. لازم به ذکر است که عملکرد آنتن پیشنهادی، توسط دو نرم‌افزار تمام‌موج CST-MWS 2016 و HFSSv15 مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، یک جدول مقایسه از عملکرد آنتن پیشنهادی و دیگر آنتن‌های معرفی‌شده در مقالات، ارائه شده است.

۲- معرفی تک‌سلولی ماتمتریالی TSPM پیشنهادی

این بخش، به‌طور کامل به معرفی تک‌سلولی ماتمتریالی TSPM پیشنهادی به‌منظور تحقق محیطی با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی پرداخته می‌شود. تک‌سلولی ماتمتریالی پیشنهادی، با استفاده از پیکربندی نمایش‌داده‌شده در شکل (۱)، توسط دو بخش SRR بالایی (SRR_1) و SRR پایینی (SRR_2) طراحی شده است. زمانی که تک‌سلولی ماتمتریالی SRR، توسط یک موج الکترومغناطیسی عمود بر محور آن تحریک شود، یک تشدید مغناطیسی ایجاد می‌گردد که فرکانس آن، با توجه به شعاع حلقه، تعیین می‌شود [۲۶]. این ساختار، دقیقاً همانند یک تشدیدگر LC عمل می‌کند؛ به‌طوری که محیط هادی فلزی خطوط انتقال حلقه‌ای شکل، اندوکتانس معادل و همچنین، شکاف بین حلقه‌ها نیز، ظرفیت خازنی مدار تشدید را برآورده می‌کنند. لازم به ذکر است که میدان مغناطیسی، الزاماً بایستی عمود بر محور حلقه باشد تا تشدید مغناطیسی رخ دهد [۲۶].

اکنون به‌منظور توجیه بهتر و دقیق‌تر چگونگی طراحی تک‌سلولی پیشنهادی، مدل مداری معادل نمایش داده‌شده در شکل (۲)، معرفی می‌گردد. این مدل، با فرض بدون اتلاف بودن ساختار ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱)، می‌توان ساختار TSPM را با تعداد محدودی از عناصر فشرده سلف و خازن مدل نمود.

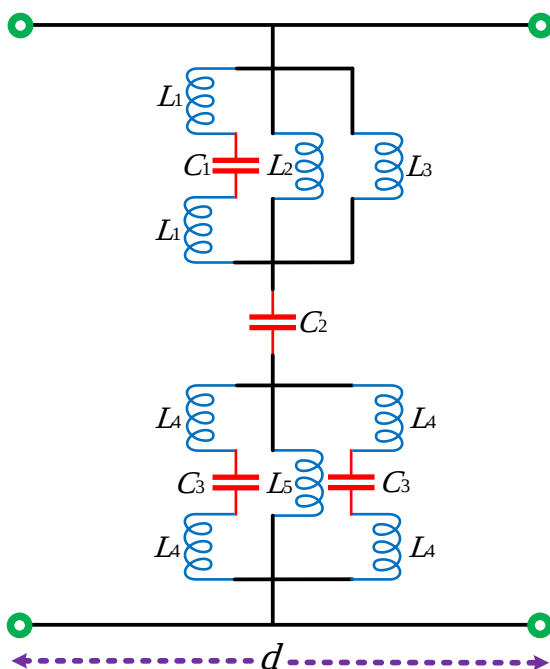
مایکرواستریپی باشند. در مرجع [۱۵]، یک آنتن پهن‌بند برای عملکرد در باند فرکانسی موج میلی‌متری، به‌کمک آرایه 10×7 از تک‌سلولی‌های ماتمتریالی نوین، با ضریب نفوذپذیری الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نزدیک به صفر معرفی شده است. مقدار بیشینه بهره در فرکانس ۶۰ GHz برابر ۱۲/۴۱ dBi گزارش شده است. اما مهم‌ترین نقیصه این طرح، علی‌رغم عملکرد مناسب آن، پیچیدگی ساختار و دشواری روند طراحی می‌باشد. در مرجع [۱۶]، یک آنتن سر-آتش^۷ مایکرواستریپی با آرایه 2×5 ماتمتریالی از SRR، با ضریب نفوذپذیری منفی به‌منظور کارکرد در باند فرکانسی WiMAX (۲/۹-۳/۵ GHz) ارائه شده است. نتایج گزارش‌شده در این مرجع، بیان‌گر بهبود بهره به‌اندازه ۶/۸ dBi در فرکانس مرکزی ۳/۵ GHz با مقایسه با حالتی که از ساختار ماتمتریالی استفاده نشده است، می‌باشد. در مرجع [۱۷]، یک ساختار الکترومغناطیسی با باند شکاف، به‌منظور افزایش جهت‌دهندگی و افزایش پهنای باند آنتن‌های مایکرواستریپ، معرفی شده است. این طرح، پهنای باند را در حدود ۱۲ درصد و همچنین، جهت‌دهندگی را به‌میزان ۱۴ dB افزایش می‌دهد. استفاده از ساختارهای الکترومغناطیسی با باند شکاف، یکی از روش‌های متداول برای افزایش بهره می‌باشد. از جمله دیگر کاربردهای آن می‌توان به کاهش اثر تزویج متقابل بین ساختار، در آنتن‌های چندورودی-چندخروجی اشاره نمود. در مرجع [۱۸]، یک آنتن مایکرواستریپ برای عملکرد در باند فرکانسی موج میلی‌متری (۵۷-۶۴ GHz) طراحی شده است. به‌منظور افزایش بهره، تک‌سلولی نوینی با ضریب نفوذپذیری الکتریکی منفی ارائه شده است. در این ساختار، از تعداد ۳۰ تک‌سلولی، در صفحه افقی آنتن استفاده شده است. این امر باعث می‌شود که بیشینه بهره آنتن در فرکانس ۶۰ GHz، برابر ۱۰/۵ dBi گردد. با توجه به مراجع معرفی‌شده، مناسب‌تر آن است که طراحان، ترجیحاً آنتنی را طراحی نمایند که علاوه بر پهنای باند مناسب و بهره بالا، ابعاد کوچکی نیز داشته باشد. لذا، تحقق این دو مهم، گام‌های رأس اهداف پژوهشگرانی است که در زمینه طراحی آنتن‌های مایکرواستریپ، فعالیت می‌نمایند.

در این مقاله، یک روش برای افزایش بهره آنتن، برای یک آنتن دو قطبی سر-آتش مایکرواستریپ، به‌منظور عملکرد در باند فرکانسی موج میلی‌متری (۵۷-۶۴ GHz)، با استفاده از یک پیکربندی جدید ماتمتریالی شامل تک‌سلولی‌های TSPM^۸، ارائه شده است. دلیل استفاده از آنتن سر-آتش به‌جای آنتن پهلوی-آتش^۹ (عرضی)، این است که قراردادن تیغه‌های ماتمتریالی^{۱۰} در نزدیکی آنتن، به‌سادگی انجام می‌پذیرد. این امر از افزایش ابعاد ساختار، جلوگیری می‌نماید. بنابراین، می‌توان با ارائه یک تحلیل و طراحی مناسب، با این تدبیر بیان‌شده، هر دو چالش اشاره‌شده پیش‌روی پژوهشگران طراحی آنتن را بهبود بخشید. در این مقاله، سازوکار طراحی روش پیشنهادی برای افزایش بهره، به‌طور کامل بیان می‌گردد. در همین راستا، در بخش ۲، به معرفی و تحلیل تک‌سلولی‌های TSPM، که ایجاد محیطی با ضریب

فرکانسی، رفتار متامتریالی نشان دهد. لازم به ذکر است که تکسلولی پیشنهادی، در هر دو فرکانس کار، محیطی با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی ایجاد می‌نماید. این ویژگی، از مهم‌ترین مزایای این مقاله به‌منظور بهبود بهره در باند فرکانسی (۵۷-۶۴ GHz) و برای پوشش سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم WiGig/IEEE 802.11ad می‌باشد.

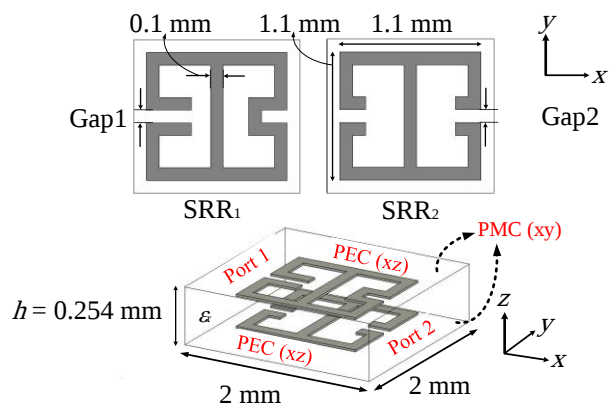
جدول ۱: مقادیر عناصر فشرده مدل مداری TSPM

خازن‌ها		سلف‌ها	
C_1	۰/۰۷ (pF)	L_1	۰/۰۵ (nH)
C_2	۰/۰۶ (pF)	L_2	۰/۰۲۶ (nH)
C_3	۰/۰۲ (pF)	L_3	۰/۰۷ (nH)
		L_4	۰/۰۶ (nH)
		L_5	۰/۰۵۷ (nH)



شکل ۲: مدل مداری تکسلولی TSPM پیشنهادی

حال با اجرای یک تحلیل تمام‌موج توسط نرم‌افزار CST-MWS برای تکسلولی متامتریالی پیشنهادی شکل (۱)، با انتخاب بهینه مقادیر $\text{Gap1} = \text{Gap2} = 0.1 \text{ mm}$ و اعمال شرایط مرزی معرفی‌شده، پارامترهای S_{11} و S_{12} محاسبه گردیده‌اند. شکل (۳)، این مقادیر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که فرکانس صفر انتقال اول ($S_{12,1}$) در فرکانس ۵۳GHz و فرکانس صفر انتقال دوم ($S_{12,2}$) نیز، در فرکانس ۶۰GHz رخ می‌دهد. نکته قابل‌توجه دیگر، با توجه به شکل (۳) این است که هر دو مشخصه S_{11} و S_{12} در هر دو فرکانس تشدید، نزدیک به هم می‌باشند. این ویژگی، از جمله ویژگی‌های طبیعی و ذاتی ساختارهای متامتریالی صفحه‌ای می‌باشد که به نظر می‌رسد ایده



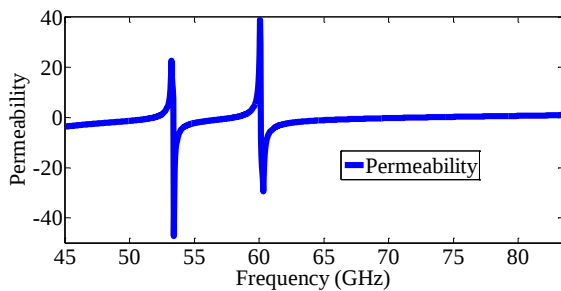
شکل ۱: هندسه تکسلولی‌های TSPM پیشنهادی طراحی‌شده بر روی یک زیرلایه عایقی

با توجه به شکل (۲)، ساختار SRR_1 توسط عناصر L_1 و L_3 و C_1 مدل گردیده‌اند. لازم به ذکر است که Gap1 با خازن C_1 مدل شده است. به‌طور مشابه و از سوی دیگر، می‌توان ساختار SRR_2 را نیز توسط عناصر فشرده L_4 و L_5 و C_3 مدل کرد. خازن C_2 نیز بیان‌گر ظرفیت خازنی تکسلولی TSPM پیشنهادی می‌باشد. با توجه به شکل (۲)، نکته مهم این است که هر دو بخش SRR_1 و SRR_2 ، دو تشدیدگر مجزا، با مقادیر عناصر متفاوت می‌باشند. لذا این ساختار، ذاتاً قابلیت ایجاد دو صفر انتقال قابل تنظیم f_1 و f_2 را به‌دلیل تفاوت عناصر موجود در هر تشدیدگر را دارد. بنابراین، می‌توان با انتخاب مقادیر مناسب برای عناصر، به فرکانس‌های کار مطلوب دست یافت. مقادیر عناصر فشرده مدل مداری پیشنهادی به‌منظور عملکرد تکسلولی پیشنهادی در فرکانس‌های کار ۵۳GHz و ۶۰GHz، در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر، توسط نرم‌افزار CST-DS 2016 حاصل شده‌اند. حال لازم است که به‌منظور اثبات مناسب‌بودن مدل مداری، برای تکسلولی پیشنهادی، تحلیل تمام‌موج نیز ارائه‌گردیده و نتایج حاصل، با نتایج مدل مداری، مقایسه شوند.

تکسلولی‌های TSPM، بر روی زیرلایه Rogers RT5880، با ارتفاع $h = 0.254 \text{ mm}$ ثابت عایقی $\epsilon_r = 2.2$ و تانژانت تلفاتی برابر 0.0009 طراحی شده‌اند. مشخصه‌های مربوط به ساختار متامتریالی TSPM، نظیر تلفات بازگشتی (S_{11}) و تلفات عبوری (S_{12})، توسط نرم‌افزار CST-MWS 2016 حاصل گردیده‌اند. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، با در نظر گرفتن شرایط مرزی PMC^{۱۱} و PEG^{۱۲} در راستای صفحات xy و xz و همچنین، با قراردادن پورت‌ها در راستای محور x ، حاصل شده است. شرایط مرزی و پورت‌ها، در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل (۱)، بخش بالایی طراحی‌شده بر روی زیرلایه (SRR_1)، ایجادکننده یک صفر انتقال ($S_{12,1}$) و بخش پایینی (SRR_2) نیز، یک صفر انتقال مجزای دیگر ($S_{12,2}$) را ایجاد می‌نماید.

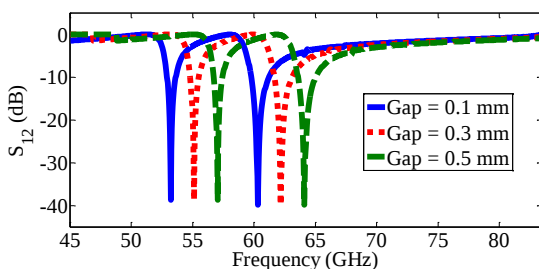
علت استفاده از تکسلولی پیشنهادی، عملکرد آن در دو فرکانس کار متفاوت می‌باشد. این ویژگی باعث می‌گردد که این ساختار، در یک پهنای باند فرکانسی وسیع‌تری نسبت به نمونه‌های مرسوم تک

یعنی منفی بودن μ_r بیان گر رفتار متامتریالی برای تکسلولی پیشنهادی می باشد [۱۲].



شکل ۵: بخش حقیقی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی تکسلولی های TSPM پیشنهادی

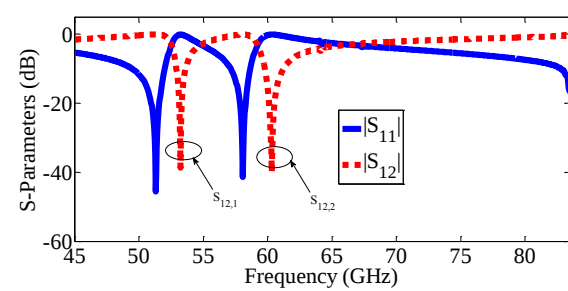
اکنون به منظور توجیه بهتر رفتار تکسلولی پیشنهادی، گزارشی از اعمال تغییرات در ابعاد تکسلولی و بیان نتیجه آن در عملکرد ساختار ارائه می شود. به منظور سادگی محاسبات، به بررسی پارامتری عرض های شکاف تکسلولی پیشنهادی یعنی Gap1 و Gap2، با فرض $Gap1 = Gap2 = Gap$ و یکسان بودن ابعاد ساختارهای SRR1 و SRR2، پرداخته می شود. این مطالعه پارامتری، نشان می دهد که هر دو بخش بالایی و پایینی ساختار، چگونه در تعیین تشدیدهای مغناطیسی نقش خواهند داشت. تأثیر شکاف های ساختار تکسلولی، بر روی مشخصه S_{12} ، در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش شکاف از ۰/۱ میلی متر تا ۰/۵ میلی متر، صفر انتقال اول از ۵۳ GHz تا ۵۷ GHz و صفر انتقال دوم از ۶۰ GHz تا ۶۴ GHz جابه جا می گردند. علت این پدیده، کاهش اثر خازنی در ساختار متامتریالی تکسلولی پیشنهادی است [۱۵].



شکل ۶: دامنه پارامتر S_{12} تکسلولی های TSPM پیشنهادی بر حسب تابعی از شکاف های حلقه ها

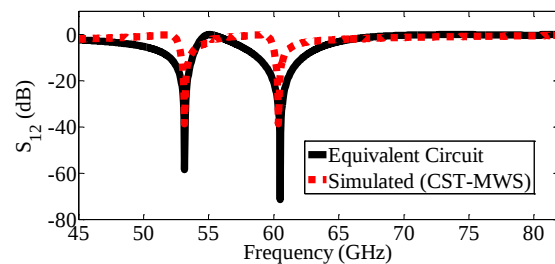
تأثیر شکاف ها بر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی تکسلولی متامتریالی TSPM، در شکل (۷) نمایش داده شده است. تشدیدهای مغناطیسی تکسلولی متامتریالی، زمانی که عرض شکاف از ۰/۱ میلی متر به مقدار ۰/۵ میلی متر افزایش پیدا می کند، به ترتیب از فرکانس ۵۳ GHz به فرکانس ۶۷ GHz و همچنین، از فرکانس ۶۰ GHz به ۶۴/۵ GHz منتقل می شوند. با توجه به نمودارهای تحلیلی ارائه شده، مقدار ۰/۱ میلی متر برای هر دو شکاف تکسلولی، انتخاب

مناسبی به منظور طراحی آنتن های چند ورودی-چند خروجی، به منظور کاهش اثر تزویج متقابل بین دهانه ها باشد.



شکل ۳: اندازه پارامترهای S_{11} و S_{12} تکسلولی های TSPM پیشنهادی

حال به منظور ارائه یک مقایسه بین نتایج حاصل از مدل مداری و همچنین، نتایج حاصل از شبیه سازی تمام موج تکسلولی پیشنهادی، پارامتر S_{21} حاصل از هر دو روش، در شکل (۴) نمایش داده شده است. مشاهده می گردد که برای پارامتر S_{21} در هر دو فرکانس برای هر دو حالت، تناسب مورد قبولی برقرار است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان خطای حاصل در محل قرارگرفتن صفرهای انتقال برای هر دو حالت، کمتر از ۰/۵ درصد می باشد.



شکل ۴: پارامتر S_{12} مدل مداری و شبیه سازی تمام موج تکسلولی TSPM

از سوی دیگر، به منظور اثبات رفتار متامتریالی تکسلولی پیشنهادی، مشخصه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ساختار از طریق رابطه (۱) محاسبه می گردد. این رابطه، برای ساختارهای SRR صفحه ای، در مرجع [۱۲] ارائه شده است که در آن، k عدد موج و h ارتفاع زیرلایه عایقی می باشند.

$$\mu_r = \left(\frac{2}{jkh} \right) \times \left[\frac{1 - (S_{12} - S_{11})}{1 + (S_{12} - S_{11})} \right] \quad (1)$$

شکل (۵)، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی تکسلولی TSPM را نمایش می دهد. با توجه به شکل (۵)، در هر دو فرکانس تشدید مغناطیسی تکسلولی پیشنهادی، مقدار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، منفی شده و به ترتیب، در فرکانس های ۵۳ GHz و ۶۰ GHz برابر ۴۸- و ۲۷- می باشد. نکته مهم تر آن است که با این ابعاد برای تکسلولی، مقدار ضریب نفوذپذیری مغناطیسی به طور میانگین، در بازه فرکانسی ۵۳ GHz تا ۶۴ GHz، نزدیک صفر و غالباً منفی می باشد. این شرایط،

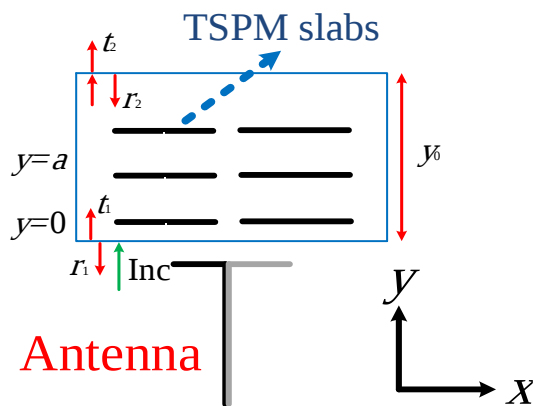
بر اساس تحلیل‌هایی که در مرجع [۱] انجام شده است، تابع انتقال (TF) برای شکل ساختار نمایش داده شده در شکل (۸)، محاسبه گردد. با محاسبه ضرایب انتقال و بازگشت امواج برخوردی با ساختار، تابع انتقال معادل، مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$TF = \frac{t_1 t_2 \exp(-j \beta_z y_0)}{1 - r_2^2 \exp(-2j \beta_z y_0)} \quad (2)$$

در این رابطه، (t_1, t_2) و (r_1, r_2) به ترتیب بیان گر ضرایب انتقال و ضرایب شکست پرتوهای برخوردکننده ساطع شده از آنتن دو قطبی به تیغه‌های متامتریالی TSPM می‌باشند. پارامتر β_z بردار موج درون ساختار تیغه‌ای متامتریالی بوده و y_0 نیز، کل عرض محدوده تیغه‌های شامل تک‌سلولی‌های متامتریالی است. اگر که ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در راستای محور z با μ_z نمایش داده شود، آن‌گاه با حل فاز رابطه (۲)، به‌زای مقادیر مختلف μ_z ، مقدار جابه‌جایی فاز در ناحیه تیغه‌های متامتریالی، بسیار کم خواهد بود. لازم به ذکر است که رابطه β_z با μ_z مطابق رابطه (۳) می‌باشد [۱].

$$\beta_z = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_z} \quad (3)$$

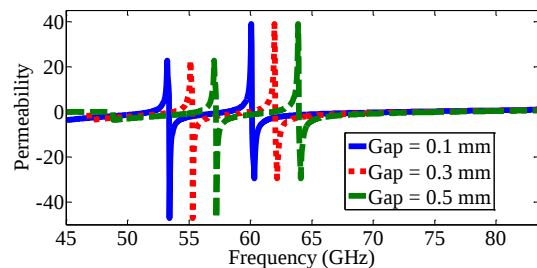
در رابطه (۳)، ϵ_0 ضریب نفوذپذیری الکتریکی در فضای آزاد و f نیز، فرکانس کار می‌باشد.



شکل ۸: آنتن دو قطبی بارگذاری شده توسط تک‌سلولی‌های متامتریالی TSPM در صفحه افقی

شکل (۹)، تغییرات فاز رابطه (۲)، بر اساس کل عرض محدوده تیغه‌های متامتریالی، به‌زای چند مقدار مختلف μ_z را نمایش می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، تغییر فاز در تیغه‌های TSPM پیشنهادی، نسبت به فضای آزاد ($\mu_z = \mu_0$) برای محدوده انتشار، بسیار کمتر است. بنابراین، میدان الکترومغناطیسی، با سرعت فاز بالاتر در داخل تیغه‌های TSPM حرکت می‌کند. با این امر، جهت‌دهندگی آنتن افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر، با افزایش جهت‌دهندگی، بهره آنتن نیز افزایش می‌یابد [۱۶]. بنابراین، اثرات متقابل بین تک‌سلولی‌های متامتریالی، با تأثیر چشم‌گیر در بازده، باعث افزایش اندازه روزه‌ای آنتن می‌شود که

می‌شود؛ چرا که با این انتخاب، به‌طور مصنوعی، در کل بازه فرکانسی ۵۳ GHz تا ۶۴/۵ GHz، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی حاصل، کاملاً اثبات کننده رفتار متامتریالی ساختار است. بنابراین، می‌توان با قراردادن آرایه‌ای از تک‌سلولی‌های متامتریالی پیشنهادی در صفحه افقی یک آنتن دو قطبی سر-آتش، بهره آنتن را افزایش داد. چگونگی چیدمان بهینه آرایه پیشنهادی، به‌طور کامل در بخش (۴)، گزارش شده است.



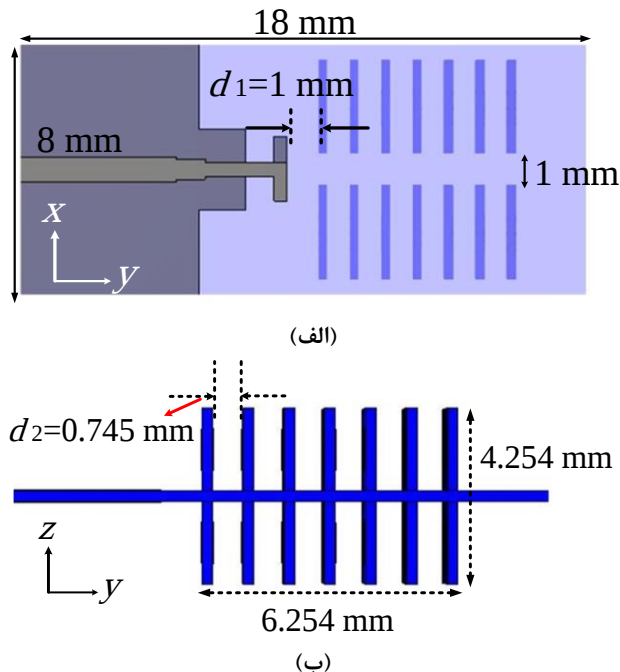
شکل ۷: بخش حقیقی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی تک‌سلولی‌های TSPM پیشنهادی بر حسب تابعی از شکاف‌های حلقه‌ها

۳- سازوکار افزایش بهره به کمک تک‌سلولی‌های متامتریالی پیشنهادی

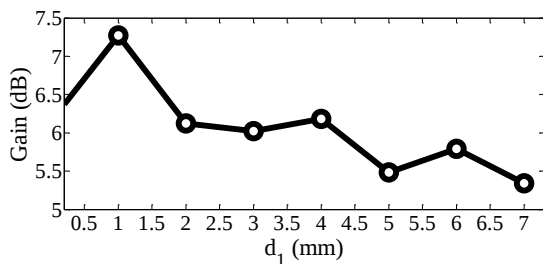
با قراردادن یک لنز عایقی^{۱۳} در برابر یک آنتن، به‌طوری که از مرکز آنتن اندکی فاصله داشته باشد، می‌توان امواج الکترومغناطیسی را در یک زاویه دلخواه و از پیش تعیین شده هدایت نموده و در نتیجه، بهره را افزایش داد. این موضوع، در مرجع [۱۴] تبیین شده است. علت این پدیده، آن است که امواج الکترومغناطیسی در دو محیط با ضریب‌های شکست متفاوت، از قانون اسنل^{۱۴} پیروی می‌کنند. در مرجع [۱۴]، دقیقاً از همین مفهوم استفاده گردیده است؛ یعنی به جای لنزهای عایقی، از لنزهای متامتریالی بهره‌برداری شده است. برخلاف لنزهای عایقی، توسط لنزهای متامتریالی می‌توان ساختارهای دوبعدی را نیز طراحی نمود. این امر با ترکیب لنزهای متامتریالی حاصل می‌شود. ایده معرفی شده در مرجع [۱۴]، زمینه‌ساز طراحی آنتن‌های با بهره بالا و ابعاد کوچک می‌باشد. با قراردادن تک‌سلولی‌های غیرهمسان‌گرد^{۱۵} متامتریالی در مقابل آنتن، این تک‌سلولی‌ها، نقش یک لنز متامتریالی را ایفا می‌کنند.

همان‌گونه که در مرجع [۱] بیان شده است، آنتن دوقطبی، نقش یک منبع شبه TE را دارد که امواج الکترومغناطیسی را تشعشع می‌نماید. هر پرتو که از منبع تشعشع می‌شود، دارای یک مشخصه تحت‌عنوان طول مؤثر مسیر در روزه تشعشعی آنتن می‌باشد. تک‌سلولی‌های متامتریالی به همراه روزه تشعشعی آنتن و پرتوها، در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل (۸)، موقعیت آنتن دو قطبی، باعث تعیین و تنظیم بهره آنتن می‌گردد؛ چرا که هر تغییری در موقعیت آنتن دوقطبی، باعث تغییر مشخصه طول مؤثر مسیر هر یک از پرتوها می‌شود. برای توجیه مناسب‌تر مفهوم این پدیده، بهتر است که

مقدار بهره آنتن را به‌ازای تغییرات d_1 از ۰/۵ تا ۷ میلی‌متر نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که اگر d_1 برابر ۱ میلی‌متر انتخاب گردد، بیشترین مقدار بهره (۷/۳۸ dB) حاصل می‌شود. این در حالی است که با این انتخاب، ابعاد کلی آنتن نیز پس از قراردادن آرایه‌های متامتریالی، به نسبت کمتری افزایش می‌یابد.



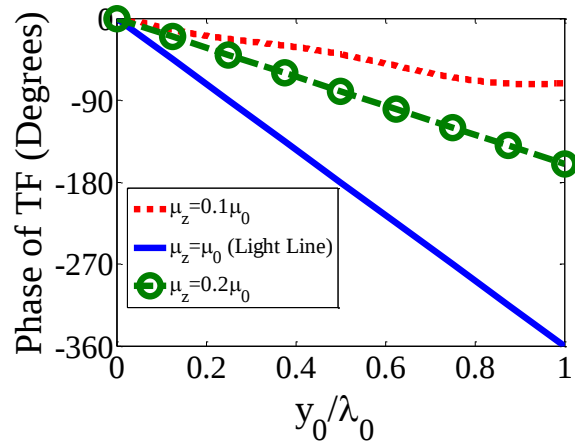
شکل ۱۰: پیکربندی آنتن پیشنهادی با تیغه‌های تک‌سلولی متامتریالی TSPM؛ (الف) نمای روبه‌روی، (ب) نمای کناری



شکل ۱۱: تغییرات بهره آنتن به‌ازای تغییرات فاصله آنتن از تیغه‌ها

اکنون با توجه به تعیین فاصله بهینه بین آنتن و تیغه‌های متامتریالی، لازم است فاصله بهینه بین تیغه‌ها (مقدار d_2) نیز تعیین گردد. برای این منظور نیز، یک گزارش پارامتری از تغییرات بهره آنتن به‌ازای فواصل مختلف تیغه‌ها از یکدیگر، در شکل (۱۲) ارائه شده است. در این تحلیل، با توجه به مقدار بهینه به‌دست‌آمده برای d_1 ، یعنی با فرض d_1 برابر ۱ میلی‌متر، از تعداد ۸ تیغه (۴ تیغه در بالا و ۴ تیغه در پایین زیرلایه، به‌طور متقارن)، استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این گزارش، فواصل بین تیغه‌ها از بازه ۰/۲۵ تا ۳ میلی‌متر انتخاب گردیده‌اند. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد هنگامی که مقدار d_2 برابر با ۰/۷۴۵ میلی‌متر می‌باشد، بیشترین بهره (۸/۲۲ dB) حاصل

نتیجه این امر، بهبود بهره آنتن می‌باشد. لازم به ذکر است که استفاده از این موضوع و تحقق چیدمان بهینه، کاهش مشخصه S_{11} (تراز گلبزرگ کناری) آنتن را نیز نتیجه می‌دهد. تراز گلبزرگ کناری که از جمله پارامترهای مهم آنتن و بیان‌گر نسبت بیشترین مقدار دامنه گلبزرگ‌های کناری به گلبزرگ اصلی است، متناسب با افزایش جهت‌دهندگی و افزایش بهره، بهبود می‌یابد [۱۶].

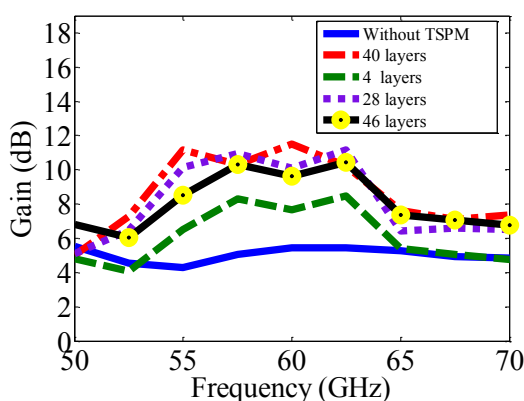


شکل ۹: تغییرات فاز تابع انتقال ساختار (TF)، به‌ازای مقادیر مختلف μ_z

۴- معرفی یک آنتن سر-آتش به‌همراه بارگذاری تیغه‌های متامتریالی پیشنهادی

در این بخش، مشخصه‌های یک آنتن دو قطبی سر-آتش گزارش شده در مرجع [۲۴]، زمانی که تیغه‌های شامل TSPM به‌طور عمودی در مقابل بازوهای آنتن قرار گرفته است، برای فرکانس مرکزی ۶۰ GHz، استخراج شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، تعداد ۱۴ تیغه از تک‌سلولی‌های متامتریالی TSPM در بالای زیرلایه، و به‌طور متقارن، ۱۴ ورقه مشابه دیگر، در پایین زیرلایه، بارگذاری شده‌اند. فاصله بین آنتن دو قطبی و تیغه‌های متامتریالی TSPM برابر 0.25λ یا معادل ۱ میلی‌متر است که این امر، باعث بهره‌برداری بهینه از اثر متقابل بین آنتن و تیغه‌ها می‌گردد. تیغه‌ها به‌گونه‌ای کاملاً متقارن بارگذاری شده‌اند تا از چرخش الگوی تشعشعی در صفحه عمودی و افقی جلوگیری شود. چرا که اگر تیغه‌ها، تحت زاویه خاصی نسبت به محور آنتن چینش گردند، گلبزرگ اصلی آنتن، دچار چرخش می‌گردد [۱]. لازم به ذکر است که در ادامه طراحی آنتن پیشنهادی، الزامی است که چگونگی تعیین فاصله مناسب بین آنتن و تیغه‌ها (d_1)، فاصله بین تیغه‌ها (d_2) و همچنین تعیین تعداد تیغه‌ها، تحلیل گردد. نخست به‌منظور تعیین فاصله بهینه بین آنتن دو قطبی و تیغه‌های متامتریالی (d_1)، تعداد ۴ تیغه (۲ تیغه در بالای زیرلایه و ۲ تیغه در پایین زیرلایه، به‌طور متقارن)، گزینش می‌گردد. حال با تغییر فاصله بین آنتن و تیغه‌ها (تغییر فاصله d_1)، تغییرات بهره محاسبه می‌گردد. این تحلیل پارامتری، در شکل (۱۱) گزارش شده است. این نمودار،

تشعشی خطی ساختار پیشنهادی، در هر دو صفحه E (xy) و صفحه H (yz)، در شکل (۱۴) برای فرکانس ۶۰ GHz نمایش داده شده است. به منظور ارائه یک مقایسه مناسب بین عملکرد آنتن پیشنهادی به همراه آرایه متامتریالی و همچنین، نمونه اولیه آنتن دو قطبی که در آن از هیچ عنصر متامتریالی استفاده نشده است، الگوی تشعشی آنتن اولیه، بر اساس ملاحظات و روند طراحی بیان شده در مرجع [۲۴] نیز در شکل (۱۵) ارائه شده است. میزان بیشینه بهره آنتن اولیه، در هر دو صفحه E و H، در زاویه ۹۰ درجه رخ داده است و مقدار آن برابر dBi ۵/۴ می باشد. این در حالی است که در شرایط مشابه، آنتن پیشنهادی این مقاله، بهره ای معادل ۱۱/۶ dBi را دارا می باشد. نتایج ارائه شده حاکی از این حقیقت است که طرح پیشنهادی، باعث افزایش بهره به میزان ۶/۲ dBi نسبت به نمونه اولیه شده است؛ چرا که وجود این تیغه های متامتریالی پیشنهادی، به طور کاملاً چشم گیر و مؤثر، باعث افزایش اندازه روزنه ای آنتن و در نتیجه، افزایش بهره می شود. این بهبود بهره، یک مزیت مهم آنتن برای پیشنهادی است. شکل (۱۶)، الگوی تشعشی سه بعدی را برای آنتن پیشنهادی در فرکانس ۶۰ GHz نمایش می دهد. این شکل، دید مناسب تری از میزان تشعشع آنتن، در اطراف خود را بیان می نماید.

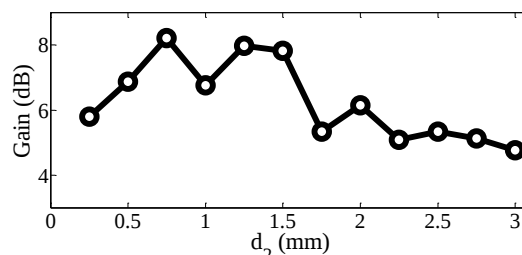


شکل ۱۳: بیشینه بهره دست یافته شده آنتن، به ازای استفاده از چندین لایه مختلف TSPM

در شکل (۱۷)، نمونه نهایی طراحی شده آنتن دو قطبی پیشنهادی به همراه آرایه ای از تک سلولی های متامتریالی TSPM را نمایش می دهد. ابعاد کلی ساختار، برابر $8\text{mm} \times 18\text{mm} \times 4/25\text{mm}$ یا $2.8 \times 4.5 \times 1.06\text{mm}$ می باشد که λ برابر طول موج در فرکانس مرکزی ۶۰ GHz است.

اندازه پارامتر تلفات بازگشتی (S_{11}) شبیه سازی شده ساختار توسط دو نرم افزار CST-MWS 2016 و HFSSv15، در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. تناسب خوبی بین نتایج حاصل از دو نرم افزار، برقرار می باشد. برای بازه فرکانسی (۵۴-۶۷ GHz)، $-10\text{ dB} < S_{11}$ به دست آمده است. مشاهده می گردد که این آنتن، قابلیت پوشش باند فرکانسی سیستم های مخابراتی بی سیم WiGig، یعنی بازه فرکانسی (۵۷-۶۴ GHz) را به خوبی دارا می باشد.

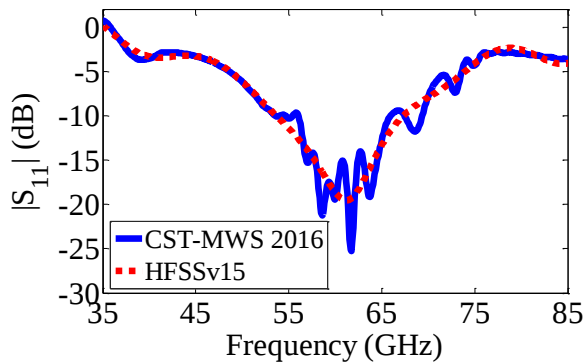
می گردد. بنابراین، فاصله بهینه بین تیغه های متامتریالی نیز، با این شیوه، به دست می آید.



شکل ۱۲: تغییرات بهره آنتن به ازای تغییرات فاصله تیغه ها

در ادامه، نتایج حاصل از یک تحلیل پارامتری دیگر به منظور توجیه مناسب تر در مورد انتخاب تعداد تیغه های متامتریالی، ارائه خواهد گردید. همان گونه که اشاره شد، عامل افزایش بهره در این آنتن، طراحی مناسب آرایه های تیغه ای متامتریالی، شامل تعداد آن ها، فاصله تیغه ها از آنتن و فاصله بین تیغه ها که به طور عمودی در صفحه xy قرار گرفته اند، می باشد. با توجه به اثر تزویج متقابل بین تیغه ها و آنتن دو قطبی، بدیهی است که بیشینه بهره، تابعی از تعداد تیغه های متامتریالی نیز می باشد. شکل (۱۳)، این تابعیت را برای بازه فرکانسی (۵۰-۷۰ GHz) نمایش می دهد. با توجه به این نمودار، برای آنتن دو قطبی اولیه بدون عنصر متامتریالی، بیشینه بهره، ۵ dB است. این در حالی است که تنها با قراردادن ۴ تیغه متامتریالی (۲ تیغه در بالا و ۲ تیغه در پایین زیرلایه، به طور متقارن) پیشنهادی در مقابل آنتن، بهره، حدوداً ۳ dB افزایش می یابد. این افزایش بهره، اثباتی بر صحت توجیهات ارائه شده در بخش های (۲) و (۳) می باشد. اکنون، هدف آن است که از تیغه ها، به تعداد مناسب که اولاً ابعاد مدار بیش از حد بزرگ نشود و ثانیاً، بهره تا حد ممکن افزایش یابد، استفاده گردد. در همین راستا، از تعداد ۴، ۲۸، ۴۰، ۴۶ تیغه استفاده شده است. نمودار شکل (۱۳)، تمامی گزارش های این چند انتخاب برای بیان میزان بهره را نمایش می دهد. نکته حائز اهمیت این است که با افزایش تعداد تیغه ها از ۲۸ تا ۴۰، بهره آنتن تنها به میزان ۱/۳۵ dB افزایش می یابد. این در حالی است که ابعاد ساختار، تقریباً دو برابر می گردد. لذا، برای طراحی نهایی، با در نظر گرفتن ملاحظات ابعادی ساختار، تعداد ۲۸ تیغه برای ساختار پیشنهادی، انتخاب می گردد. لازم به ذکر است، میزان بهره در این حالت، در فرکانس ۶۰ GHz برابر ۱۰/۵ dB می باشد.

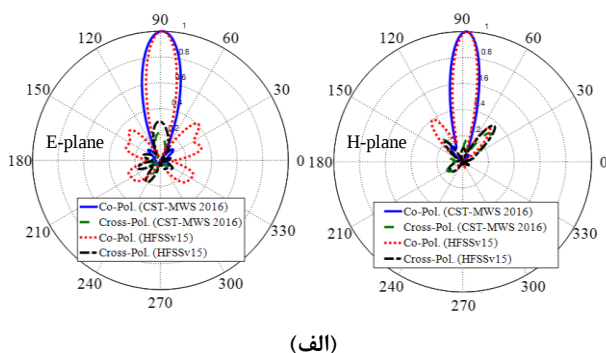
با توجه به تحلیل های ارائه شده، آرایه تک سلولی متامتریالی TSPM، در صفحه xy، به فاصله 0.18λ از یکدیگر قرار دارند. این فاصله برابر 0.745mm می باشد. از طرفی، لازم به ذکر است که از یک زیرلایه مشابه برای ساخت آنتن و تیغه های متامتریالی استفاده شده است. همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، در طراحی آنتن پیشنهادی، از ۲۸ عدد تیغه متامتریالی در راستای محور Z و در بالا و پایین آنتن، استفاده شده است. در این صورت، الگوی



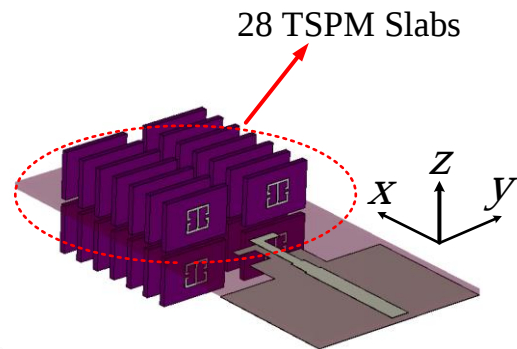
شکل ۱۸: نتیجه حاصل از شبیه‌سازی اندازه پارامتر ضریب تلفات بازگشتی آنتن دو قطبی، به همراه تک‌سلولی‌های TSPM

الگوی تشعشعی دوبعدی حاصل از شبیه‌سازی تمام‌موج آنتن دو قطبی سر-آتش پیشنهادی به کمک هر دو نرم‌افزار CST-MWS 2016 و HFSSv15 با ساختارهای TSPM، در هر دو صفحه E و صفحه H، در شکل (۱۹)، برای فرکانس‌های ۵۷ GHz، ۶۰ GHz و ۶۴ GHz نمایش داده شده است. در این شکل نیز، تناسب مناسبی بین نتایج حاصل از دو نرم‌افزار مشاهده می‌گردد. با توجه به شکل (۱۹)، بیشینه پلاریزاسیون متقابل نرمالیزه در صفحه E توسط نرم‌افزار CST-MWS برای فرکانس‌های ۵۷ GHz، ۶۰ GHz و ۶۴ GHz، به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ می‌باشد. این مقادیر توسط نرم‌افزار HFSSv15 نیز به ترتیب برابر ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۲۵ حاصل گردیده‌اند. همچنین، بیشینه پلاریزاسیون متقابل نرمالیزه در صفحه H توسط نرم‌افزار CST-MWS برای فرکانس‌های ۵۷ GHz، ۶۰ GHz و ۶۴ GHz، به ترتیب برابر ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۴۲ می‌باشد. این مقادیر توسط نرم‌افزار HFSSv15 نیز به ترتیب به صورت ۰/۴، ۰/۴ و ۰/۳۲ حاصل شده‌اند.

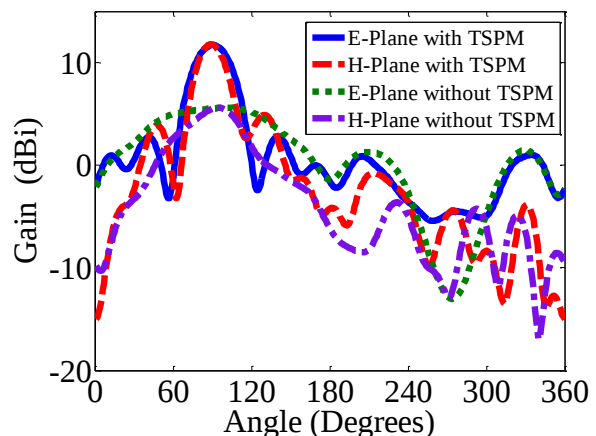
بازده تشعشعی آنتن پیشنهادی، در فرکانس ۶۰ GHz برابر ۸۸٪ است؛ این در حالی است که بازده یک آنتن دو قطبی معمولی، ۹۵٪ می‌باشد. اما این کاهش بازده، به علت تلفات اهمی ایجاد شده است. جدول (۲)، بیشینه بهره و بازدهی تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی تمام‌موج ساختار پیشنهادی، به همراه نتایج نظیر برای آنتن اولیه بدون استفاده از ساختارهای ماتریالی TSPM، در فرکانس‌های مختلف را بیان می‌نماید. فرکانس‌های گزینش‌شده، فرکانس‌هایی هستند که در بازه فرکانسی WiGig، از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشند.



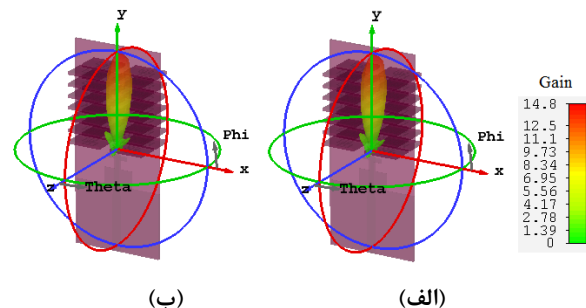
(الف)



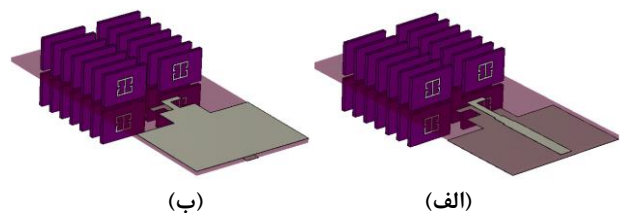
شکل ۱۴: پیکربندی آنتن پیشنهادی، با تعداد ۲۸ تیغه از تک‌سلولی ماتریالی TSPM



شکل ۱۵: الگوی تشعشعی آنتن پیشنهادی، در مقایسه با نمونه اولیه، در فرکانس ۶۰ GHz



شکل ۱۶: الگوی تشعشعی سه‌بعدی آنتن دو قطبی در فرکانس کاری ۶۰ GHz، به همراه تک‌سلولی‌های ماتریالی TSPM؛ (الف) در صفحه E، (ب) در صفحه H



شکل ۱۷: طرح نهایی آنتن دو قطبی پیشنهادی با بارگذاری TSPM در صفحه افقی؛ (الف) نمای بالایی، (ب) نمای زیرین

جدول ۳: مقایسه عملکرد آنتن پیشنهادی، با دیگر آنتن‌های

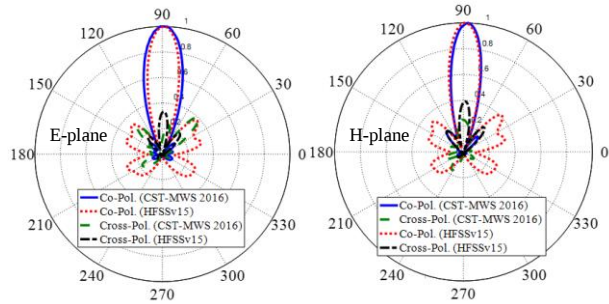
معرفی شده در مقالات

راند طراحی	ابعاد آنتن (mm ³)	میانگین بهره (dB)	بازدهی تثعشی در ۶۰GHz (%)	بازه فرکانسی (GHz)	مرجع
پیچیده	۶/۵×۵×۳/۱۵	۱۰/۵	۹۱/۴	۵۷-۶۴	[۱]
پیچیده	۲۰×۱۵×۱/۰۲	۱۲/۴	---	۵۷-۶۴	[۱۰]
پیچیده	۲۲×۲۱/۷×۱	۱۰/۵	۸۳	۵۷-۶۶	[۱۸]
پیچیده	۳۰×۳۰×۱/۵۷	۱۰/۲	---	۵۶-۶۷	[۱۹]
پیچیده	۱۰/۵×۲۰×۱۰	۷/۲	---	۵۷-۶۴	[۲۰]
ساده	۱۰×۱۵×۲	۷/۵	۸۵	۵۸-۶۲	[۲۱]
ساده	۸×۱۸×۴/۲۵	۱۰/۳	۸۸	۵۷-۶۴	این مقاله

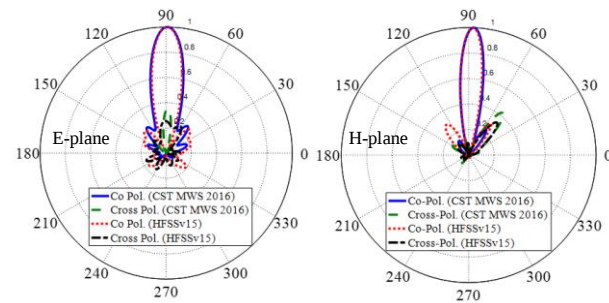
نتایج حاصل از شبیه‌سازی تمام‌موج توسط دو نرم‌افزار CST-MWS 2016 و HFSSv15، نشان می‌دهد که آنتن پیشنهادی، قابلیت پوشش باند فرکانسی (۵۷-۶۵ GHz) به‌منظور عملکرد مناسب در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم WiGig را دارا می‌باشد. بیشینه بهره حاصل، برابر dB ۱۰/۵ در فرکانس ۶۰GHz است. ابعاد ساختار پیشنهادی، به‌دلیل چینش مناسب تیغه‌ها و طراحی بهینه، کوچک (۲۸.×۴/۵۸.×۱/۰۶۸.) می‌باشد. تک‌سلولی پیشنهادی، به‌وضوح نشان داد که می‌توان با یک طراحی دقیق و با اعمال تغییراتی بهینه در آنتن پیشنهادی، یک آنتن چند ورودی-چند خروجی، با عملکرد مناسب نیز طراحی نمود. یقیناً در آینده‌ای نزدیک، دیگر محققان و خوانندگان، به بررسی و طراحی این ایده، خواهند پرداخت.

مراجع

- [1] A. Dadgarpour, M. S. Sorkherizi, T. A. Denidni and A. A. Kishk "Passive beam switching and dual-beam radiation slot antenna loaded with ENZ medium and excited through ridge gap waveguide at millimeter-waves," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 1, pp. 92-102, Jan. 2017.
- [2] J. Du, E. Onaran, D. Chizhik, S. Venkatesan and R. A. Valenzuela, "Gbps user rates using mm wave relayed backhaul with high gain antennas," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1363-1372, Jun. 2017.
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [4] M. Moosazadeh, S. Kharkovsky, J. T. Case and B. Samali, "Improved radiation characteristics of small antipodal Vivaldi antenna for microwave and millimeter wave imaging applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 1961-1964, 2017.
- [5] K. Ding, C. Gao, T. Yu, D. Qu and B. Zhang, "Gain-improved broadband circularly polarized antenna array with parasitic patches," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 1468-1471, Dec. 2016.
- [6] M. Asaadi and A. Sebak, "High-gain low-profile circularly polarized slotted SIW cavity antenna for MMW applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 752-755, Aug. 2016.
- [7] Y. J. Cheng, W. Hong and K. Wu, "Millimeter-wave multibeam antenna based on eight-port hybrid," IEEE



(ب)



(پ)

شکل ۱۹: الگوی تشعشی دوبعدی نرمالیزه آنتن پیشنهادی، در صفحات E و H: (الف) فرکانس ۵۷ GHz، (ب) فرکانس ۶۰ GHz، (پ) فرکانس ۶۴ GHz

جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیشینه بهره و بازده تشعشی آنتن پیشنهادی و آنتن اولیه بدون TSPM

فرکانس (GHz)	بیشینه بهره (dB) (بدون TSPM)	بیشینه بهره (dB) (با TSPM)	بازدهی تثعشی (%) (بدون TSPM)	بازدهی تثعشی (%) (با TSPM)
۵۸	۴/۲	۱۰/۲	۸۵	۸۳
۵۹	۴/۵	۱۰/۲	۹۲	۸۷
۶۰	۴/۷	۱۰/۵	۹۵	۸۸
۶۱	۴/۷۵	۱۰/۳	۸۳	۸۴
۶۲	۴/۶	۱۰/۴	۸۱	۷۸

در جدول (۳)، مشخصه‌های شایان ذکر آنتن پیشنهادی، با عملکرد دیگر ساختارهای پیشین ارائه‌شده در مقالات، مقایسه شده است. ویژگی‌های قابل‌توجه ساختار پیشنهادی شامل دستیابی به یک بهره بالا و همچنین، ابعاد کوچک و از همه مهم‌تر، سادگی طراحی تک‌سلولی دو بانده و تیغه‌های متامتریالی آن می‌باشد.

۵- نتیجه

در این مقاله، یک روش برای افزایش بهره یک آنتن دوقطبی، با به‌کارگیری آرایه‌های پیشنهادی متامتریالی TSPM در صفحه افقی آنتن، ارائه شده است. پیکربندی متامتریالی TSPM تک‌سلولی، برگرفته از تشدیدکننده‌های حلقه‌ای شکافدار، با تزویج بهبودیافته می‌باشد. تعداد ۱۴ تیغه در بالای زیرلایه آنتن و در مقابل آن، ۱۴ تیغه مشابه، در زیر زیرلایه، تعبیه شده است.

[۱۷] فرهاد خسروی افوسی، محمدنقی آذرمنش و جواد نوری‌نیا، «به‌کارگیری ساختارهای EBG به منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویته آنتن میکرواستریپ»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۲، جلد ۴۳، صفحه ۸-۱، ایران، ۱۳۹۲.

- [18] M. Sun, Z. N. Chen and X. Qing, "Gain Enhancement of 60-GHz Antipodal Tapered Slot Antenna Using Zero-Index Metamaterial," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1741-1746, Apr. 2013.
- [19] K. B. Ng, C. H. Chan, H. Zhang and G. Zeng, "Bandwidth enhancement of planar slot antenna using complementary source technique for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 9, pp. 4452-4458, Sep. 2014.
- [20] A. Dadgarpour, B. Zarghooni, B. S. Virdee and T. A. Denidni, "Single end-fire antenna for dual-beam and broad beamwidth operation at 60 GHz by artificially modifying the permittivity of the antenna substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4068-4073, Sep. 2016.
- [21] A. B. Guntupalli and K. Wu, "60-GHz circularly polarized antenna array made in low-cost fabrication process," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 864-867, 2014.
- [22] S. Mohammadi-Asl, J. Nourinia, Ch. Ghobadi, M. Majidzadeh, E. Mostafapour and A. Haghshenas, "Wideband High-Gain modified dual-band and dual-circularly polarized array antenna," *Wireless Personal Communications*, pp. 1-14, Jun. 2017.
- [23] N. Malekpour, M. A. Honarvar, A. Dadgarpour, B. S. Virdee and T. A. Denidni, "Compact UWB mimo antenna with band-notched characteristic," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 5, pp. 1037-1041, May 2017.
- [24] G. Zheng, A. A. Kishk and A. B. Yakovlev, "Simplified feed for modified printed Yagi antenna," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 8, pp. 464-466, Apr. 2004.
- [۲۵] وحید نجفی و محمد بمانی، «طراحی و ساخت آنتن یاگی‌یودا ریزنواری با قابلیت کار در دو باند فرکانسی ۰/۹۱۵ و ۲/۴۴۰ گیگاهرتز»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۲، جلد ۴۷، صفحه ۷۳۹-۷۳۵، ایران، ۱۳۹۶.
- [26] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, New York: Wiley, 2004.

- Microwave and Wireless Component Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 212-214, Apr. 2009.
- [8] A. B. Guntupalli, T. Djerfati and K. Wu, "Two-dimensional scanning antenna array driven by integrated waveguide phase shifter," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 3, pp. 1117-1123, Mar. 2014.
- [9] W. Choi, K. Park, Y. Kim, K. Kim and Y. Kwon, "A V-band switched beam-forming antenna module using absorptive switch integrated with 4x4 butler matrix in 0.13-μm CMOS," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 12, pp. 4052-4059, Dec. 2010.
- [10] W. Hong, A. Goudelev, K. h. Baek, V. Arkhipenko and J. Lee, "24-element antenna-in-package for stationary 60-GHz communication scenarios," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 738-741, 2011.
- [11] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martín, R. M. Sillero, F. Falcone, T. Lopetegui, M. A.G. Laso, J. García-García, I. Gil, M. F. Portillo and M. Sorolla, "Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary splitting resonators coupled to planar transmission lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53 no. 4, pp. 1451-1461, Apr. 2005.
- [12] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [13] W. Cao, B. Zhang, A. Liu, T. Yu, D. Gao and Y. Wei, "Gain enhancement for broadband periodic endfire antenna by using split-ring resonator structures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 7, pp. 3513-3516, Jul. 2012.
- [14] A. Dadgarpour, M. Sharifi Sorkherizi and A. A. Kishk, "Wideband, low-loss magneto-electric dipole antenna for 5G wireless network with gain enhancement using meta lens and gap waveguide technology feeding," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 12, pp. 5094-5101, Dec. 2016.
- [15] A. Dadgarpour, B. Zarghooni, B. S. Virdee and T. A. Denidni, "Beam-deflection using gradient refractive-index media for 60-GHz end-fire antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3768-3774, Aug. 2015.
- [16] A. Dadgarpour, B. Zarghooni, B. S. Virdee and T. A. Denidni, "High-gain end-fire bow-tie antenna artificial dielectric layers," *IET Microwave, Antennas and Propagation*, vol. 9, no. 12, pp. 1254-1259, Sep. 2015.

زیر نویس‌ها

- 1 Parasitic patches
- 2 Substrate Integrated Waveguide (SIW)
- 3 Metamaterial
- 4 Split Ring Resonator
- 5 Complementary Split Ring Resonator
- 6 Mutual coupling
- 7 End-Fire
- 8 Two-Sided Planar Metamaterial (TSPM)
- 9 Broad side
- 10 Metamaterial slabs
- 11 Perfect Magnetic Conductor (PMC)
- 12 Perfect Electrical Conductor (PEC)
- 13 Dielectric lens
- 14 Snell's law
- 15 Anisotropic
- 16 Side Lobe Level (SLL)