

Vol. 12/ No. 46/Winter 2023

Research Article

# Magnetic-Electric Dipole Antenna with Circular Polarization Feature and Directional Pattern with Improved Bandwidth

Seied Ali Banihashem, PhD Student <sup>1</sup>  | Pejman Mohammadi, Associate Professor <sup>2\*</sup>  | Yashar Zehforoosh, Associate Professor <sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia Iran, [ali\\_banihashem@yahoo.com](mailto:ali_banihashem@yahoo.com)

<sup>2</sup>Microwave and antenna research center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, [pmohammady@yahoo.com](mailto:pmohammady@yahoo.com)

<sup>3</sup>Microwave and antenna research center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, [y.zehforoosh@srbiau.ac.ir](mailto:y.zehforoosh@srbiau.ac.ir)

**Correspondence**

Pejman Mohammadi, Associate Professor of Microwave and antenna research center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, [pmohammady@yahoo.com](mailto:pmohammady@yahoo.com)

**Received:** 28 June 2022

**Revised:** 23 July 2022

**Accepted:** 20 September 2022

## Abstract

This paper introduces a new and compact structure of a directional antenna consisting of an electric dipole and a truncated connection element. This antenna is fed by a  $\Gamma$  shaped power line. Wide impedance bandwidth in the frequency range of 1.3 GHz to 3 GHz will be observed in the output performance of this antenna. Base radiation patterns with high main loop and low side and back loop level are other features of the introduced antenna. The antenna design process is step-by-step and parametric based on the important parameters of antenna geometry. The main feature of the antenna is the realization of circular polarization at a high percentage of implicative bandwidth. The radiation patterns of orthogonal plates E & H along with left and right circular polarization patterns for the desired antenna have been extracted and analyzed. As predicted, there are many similarities between the E and H plane pattern, which indicates the accuracy of the design process. Is. The maximum total gain of the antenna in the designed frequency band is about 10 dBi.

**Keywords:** Antenna, Dipole, Circular Polarization, Directional

## Highlights

- This paper introduces a new and compact structure of a directional antenna consisting of an electric dipole and a truncated connection element.
- Base radiation patterns with high main loop and low side and back loop level are other features of the introduced antenna.
- There are similarities between the E and H plane pattern, which indicates the accuracy.

**Citation:** S. A. Banihashem, P. Mohammadi, and Y. Zehforoosh, "Magnetic-electric dipole antenna with circular polarization feature and directional pattern with improved bandwidth," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 46, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.1962047.1164, (in Persian).

## مقاله پژوهشی

# آنتن دو قطبی مغناطیسی-الکتریکی با خصیصه قطبش دایروی و الگوی تشعشعی یک جهته با هدف بهبود پهنای باند

سید علی بنی هاشم<sup>۱</sup> | پژمان محمدی<sup>۲\*</sup> | یاشار زهرفروش<sup>۳</sup> 

## چکیده:

در این مقاله ساختار جدید و فشرده‌ای از آنتن یک جهته که از یک دو قطبی الکتریکی صفحه‌ای و یک المان اتصال کوتاه شده تشکیل شده، معرفی می‌شود. این آنتن توسط یک خط تغذیه  $\Gamma$  شکل تحریک می‌گردد. پهنای باند امیدانسی عریضی در بازه فرکانسی  $1/3$  گیگاهرتز تا  $3$  گیگاهرتز در عملکرد خروجی این آنتن مشاهده می‌شود. الگوهای تشعشعی پایه‌دار با سطح گلبرگ اصلی بالا و سطح گلبرگ فرعی و پشتی کم از خصایص دیگر آنتن معرفی شده‌اند. فرایند طراحی آنتن به صورت پله به پله و پارامتریک بر مبنای مقادیر کلیدی هندسه آنتن صورت پذیرفته است. خصیصه اصلی آنتن مورد نظر، تحقق قطبش دایروی در درصد بالایی از پهنای باند کاربردی است. الگوهای تشعشعی صفحات متعامد E و H همراه با الگوهای قطبش دایروی چپ‌گرد و راست‌گرد برای آنتن مورد نظر استخراج شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. شباهت زیادی میان الگوی صفحه‌ای E و H وجود دارد که نشان‌دهنده دقت فرایند طراحی است. از سوی دیگر برای مطالعه حالت قطبش دایروی، نمودارهای چپ‌گرد و راست‌گرد بر مبنای جهت بیم اصلی و سطح قطبش متعامد دارای عملکرد قابل قبولی هستند. بیشینه بهره کلی آنتن در باند فرکانس طراحی شده نزدیک  $10$  دسیبل است.

کلید واژه‌ها: آنتن، قطبش دایروی، دو قطبی الکتریکی مغناطیسی

<sup>۱</sup> گروه برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران،  
ali\_banihashem@yahoo.com

<sup>۲</sup> مرکز تحقیقات میکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران،  
p.mohammadi@iaurmia.ac.ir

<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات میکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران،  
y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

نویسنده مسئول

\* پژمان محمدی، دانشیار، مرکز تحقیقات میکروویو و آنتن،  
واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه،  
ایران، p.mohammadi@iaurmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۷ تیر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۱ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۹ شهریور ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.1962047.1164.11>

## ۱- مقدمه

به دلیل پیشرفت در نسل‌های جدید مخابراتی مثل شبکه‌های نسل چهارم، سیستم‌های پهن باند نسل جدید و استانداردهای جدید IEEE برای شبکه‌های بی‌سیم محلی و شبکه‌های مبتنی بر ساختارهای اینترنت اشیا، نیاز به آنتن‌های پهن باند با سبب فیزیکی کم و الگوهای تک جهته ضروری است [۱-۵]. این آنتن‌ها می‌توانند گزینه مناسبی برای شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم هستند که از لحاظ الکتریکی دارای رفتارهای منحصر به فردی هستند که می‌توان به پهنای باند امیدانسی وسیع، سطح پایین قطبی شدگی متقاطع، تشعشع انتهایی کم و الگوی تشعشعی متقارن و بهره پایدار در محدوده فرکانسی مورد نظر اشاره کرد [۲]. مطالعات زیادی بر روی معرفی سیستم‌های تک جهته پهن باند و عناصر تشعشعی مرتبط با آن صورت پذیرفته است. یک آنتن تک جهته می‌تواند با قرارگیری یک دو قطبی ربع طول موج که یک صفحه زمین محدود، آن را احاطه کرده است محقق گردد [۳]. چون ارتفاع این نوع آنتن‌ها بر حسب طول موج فرکانسی سنجیده می‌شود و وابستگی به فرکانس دارند، دارای نقیصه‌ی تغییرات زیاد در بهره و پهنای بیم حول حوش محدوده فرکانسی عملیاتی است. یکی از ساختارهای متداول دیگر، استفاده از آنتن‌های ریزنوار است، مقالات زیادی برای طراحی آنتن‌های پهن باند ریزنوار که از تغذیه پروب L شکل، تزویج دریچه‌ای،

استفاده از شکاف U شکل و زائده‌های پارازیتیک معرفی گردیده است [۴-۸]. بسیاری از این ساختارها دارای پهنای باند امیدانسی مناسب برای کاربردهای مخابراتی مبتنی بر استانداردهای روز دنیا از جمله IEEE هستند. با این حال تغییرات الگوی تشعشعی در پهنای باند امیدانسی و سطح قطبی شدگی متقاطع بالا از نقاط ضعف این ساختارها هستند [۹]. با وجود اینکه روش‌هایی مثل حذف فاز مخالف، اتصالات L شکل تزویجی و تغذیه اتصال M شکل برای رفع این نقایص معرفی شده‌اند ولی هدف اصلی، کاهش سطح قطبش متقاطع و پایدار کرده بهره آنتن است [۱۰]. می‌توان نتیجه گرفت چالش اصلی در این زمینه تغییرات عرض بیم با فرکانس در صفحات E و H است. برای دسترسی به الگوی تشعشعی نسبتاً هم‌شکل در صفحات E و H و داشتن عملکرد پایدار در پهنای باند امیدانسی، ایده اصلی استفاده از آنتن‌های خودمکمل که یک دوقطبی الکتریکی و یک دوقطبی مغناطیسی دارد، است [۱۱]. کاملاً واضح است دوقطبی الکتریکی الگو تشعشعی پروانه‌ای (دوطرفه) در صفحه E و الگوی تشعشعی همه جهته در صفحه H است [۱۲]. در حالی که برای یک دوقطبی مغناطیسی این قضیه در حالت عکس صادق است. اگر هر دو این دوقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی به نحوی بتوانند به‌طور هم‌زمان با یک دامنه و فاز مقتضی تحریک شوند، الگوی تشعشعی تک جهته با در صفحات E و H مشابه می‌تواند به دست آید. غالب ساختارهای معرفی شده در این حوزه بر مبنای ترکیبی از صفحات شیاری و دی‌الکتریک هستند ولی مشکل اصلی، پهنای باند امیدانسی کم است. از سوی دیگر، قطبی شدگی یکی دیگر از فاکتورهای مهم تعیین عملکرد سیستم‌های مخابراتی است به نحوی که عدم تطبیق قطبی شدگی منجر به نقایصی چون محوشدگی چندمسیره و تأثیرات مخرب تداخل خواهد شد. عدم تطابق قطبی شدگی و تأثیر انعکاسات چند مسیری منجر به تغییر قطبی شدگی از حالت چپ‌گرد به راست‌گرد و بالعکس خواهد شد. اگر هر دو آنتن در طرف فرستنده و گیرنده دارای خصیصه قطبی شدگی دایروی هستند، ایرادات مذکور چالش طراحی محسوب نخواهند شد [۱۳-۲۰]. آنتن‌های ریزنوار مسطح با قطبی شدگی دایروی با ابعاد نسبتاً کم برای سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم مناسب و قابل توجه است. در این سیستم‌ها این خصایص با روش‌های مختلفی به دست می‌آیند، که اغلبشان از تحریک دو مود متعامد به روش‌های زیر قابل تحقق است [۲۱-۲۳].

۱- اعمال زائده T شکل عمود بر خط تغذیه هم‌صفحه

۲- استفاده از زائده‌های L شکل در گوشه زمین آنتن شکافدار

۳- اعمال شکاف‌هایی در صفحه زمین و استفاده از المان پارازیتیک

در این تحقیق یک ساختار نوین دوقطبی الکتریکی مغناطیسی خود مکمل با بهره نسبتاً مناسب و الگوهای تشعشعی متقارن در صفحات E و H معرفی شده است. ساختار پیشنهادی شامل یک صفحه اتصال کوتاه شده تربیعی طول موج و یک دوقطبی صفحه‌ای که معادل با ترکیب ساختارهای الکتریکی و مغناطیسی است. برای مشخص کردن عملکرد آنتن پهنای باند امیدانسی منحنی‌های الگوهای تشعشعی نمایش داده شده‌اند. به دلیل عملکرد مناسب الکتریکی ساختار آنتن پیشنهادی گزینه مناسبی برای مخابرات بی‌سیم است.

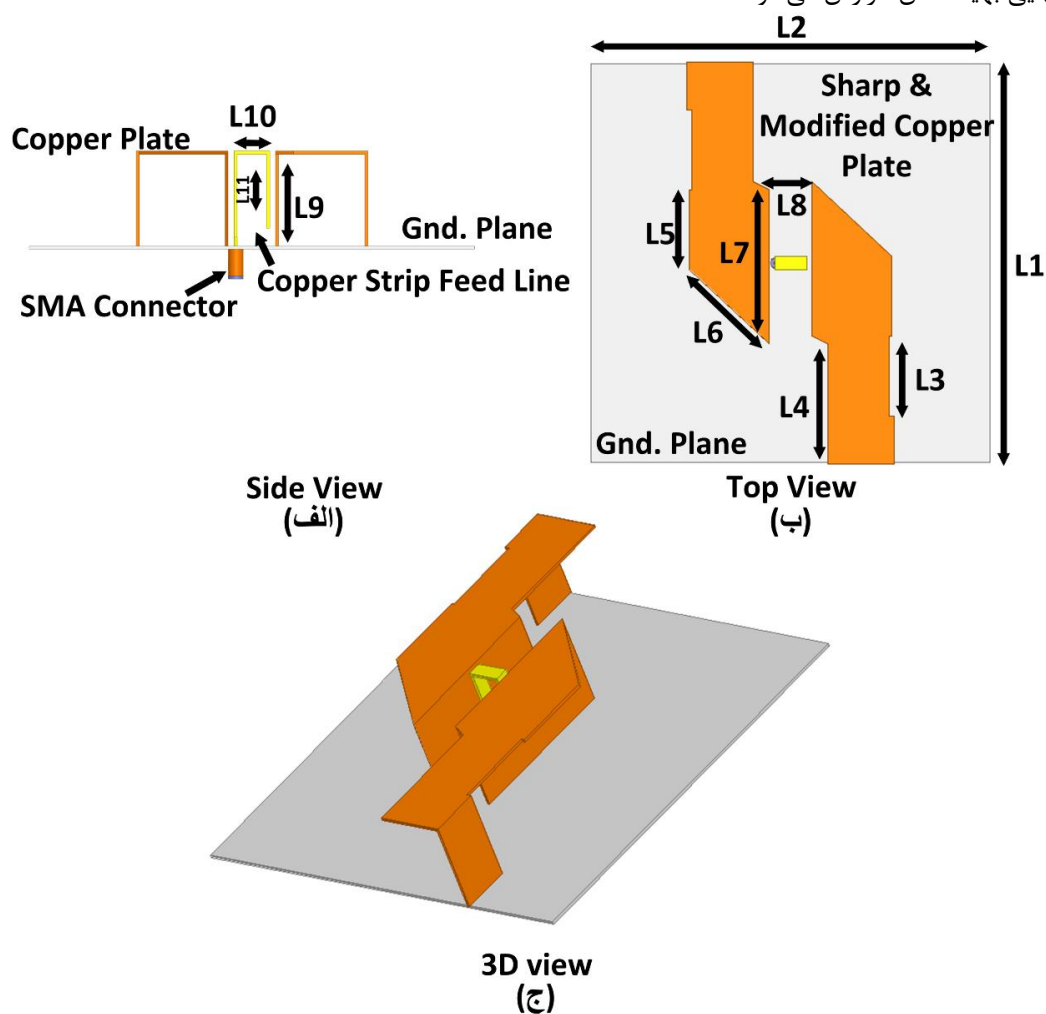
در پهنای باند امیدانسی آنتن مورد نظر چند باند کاربردی بر مبنای معیار کمسیون ارتباطات فدرال به شرح ذیل تحت پوشش قرار می‌گیرند. باند فرکانسی (۲/۱۵۵-۲/۱۱۰ گیگاهرتز) برای مخابرات ثابت و سیار که باند مورد نظر مربوط به لینک پایین است لازم به ذکر است باند (۱/۷۵۵-۱/۷۱۰ گیگاهرتز) نیز برای لینک بالا طبق این استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. باند فرکانسی (۲/۲۹۰-۲/۲۰۰ گیگاهرتز) این باند برای کاربرد مخابرات سیار دیدمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. باند فرکانسی (۲/۳۴۵-۲/۳۲۰) برای کانال‌های رادیویی، باند فرکانسی کاربردی صنعتی علمی و پزشکی<sup>۱</sup>، در صنعت مخابرات برای شبکه‌های بی‌سیم تحت استاندارد IEEE802.15.4, IEEE802.11 و باند فرکانسی ۵-۲/۶۹۰-۲/۶۵۵ گیگاهرتز در صنعت رادیوهای نجومی کاربرد دارد.

## ۲- طراحی آنتن

ساختار پیشنهادی بر مبنای ترکیب دوقطبی الکتریکی با دوقطبی مغناطیسی است. از میان ساختارهای متعدد برای دوقطبی الکتریکی یک دوقطبی صفحه‌ای پهن باند با یک تشدیدگر اتصال کوتاه شده مداری که به‌عنوان دوقطبی مغناطیسی در نظر

<sup>1</sup> Industrial Scientific Medical

می-گیریم استفاده می‌شود. [۲۳-۲۵] برای ترکیب این دو آنتن تشدیدگر اتصال کوتاه شده به صورت عمودی قرار گرفته است و به دو قطبی صفحه‌ای متصل می‌شود. بر مبنای این فرضیه یک آنتن پهن باند جدید با ساختار نوین به دست می‌آید که در فرکانس میانی ۲/۵ گیگاهرتز عمل می‌کند. هر قسمت از دو قطبی الکتريکی دارای پهنای نصف طول موج در فضای آزاد بوده و طول آن ربع طول این مضرب است. تشدیدگر اتصال کوتاه شده دارای ارتفاع ۳۰ میلی‌متر بوده که دقیقاً معادل با طول تشدیدگر است. به منظور دسترسی به خصیصه پهن باند، فاصله بین دو صفحه عمودی بسیار مهم بوده و توسط تحلیل پارامتریک بهینه می‌گردد. معیار اولیه برای این مقدار، چیزی در حدود ۰/۱۵ طول موج است که از مرجع [۲۳] اقتباس شده است. نکته کلیدی این طراحی انتخاب اندازه صفحه زمین است که شدیداً الگوی تشعشعی تحت تأثیر قرار خواهد داد. با انتخاب دقیق این پارامتر تشعشع از انتها به کمینه مقدار مورد نظر تقلیل خواهد یافت. به منظور تغذیه آنتن یک پروب  $\Gamma$  شکل استفاده شده است که از سه بخش به هم پیوسته متالیزه تشکیل شده‌اند. اولین قسمت، که قسمت عمودی است، از انتها به کابل هم‌محور و صفحه زمین متصل شده است. این قسمت باید دارای امپدانس مشخصه ۵۰ اهم به منظور تطبیق امپدانس صحیح و انتقال به سایر قسمت‌ها است. قسمت دوم به صورت افقی به موازات صفحه زمین و متصل به قسمت قبلی قرار گرفته است و مسئول تزویج انرژی الکتريکی به صفحه دو قطبی و رزوناتور اتصال کوتاه شده است. مشخصات مداری این قسمت با کنترل طول فیزیکی قابل تحقق است. نکته مهم در این است که، این قسمت شدیداً خاصیت اندوکتانسی از خود نشان داده و می‌تواند تطبیق کلی آنتن را تحت تأثیر قرار دهد. قسمت سوم که به صورت صفحه عمودی با قسمت قبلی هم‌شکل شده است. مانند یک خط انتقال مدار باز است. در جدول ۱ ابعاد نهایی بهینه آنتن گزارش می‌شود.



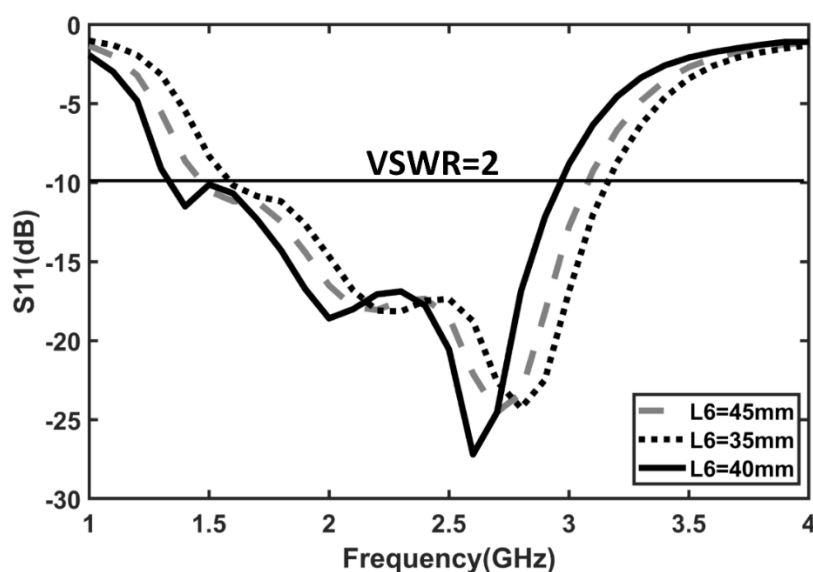
شکل ۱: نمای کلی آنتن پیشنهادی (الف) نمای کناری (ب) نمای بالا (ج) نمای سه بعدی

جدول ۱: ابعاد بهینه آنتن نهایی (ابعاد برحسب میلی‌متر)

L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>9</sub>	L <sub>10</sub>	L <sub>11</sub>
۱۵۰	۱۵۰	۳۰	۴۴/۵	۳۰	۴۰	۵۸	۱۶	۳۲	۱۲	۲۵

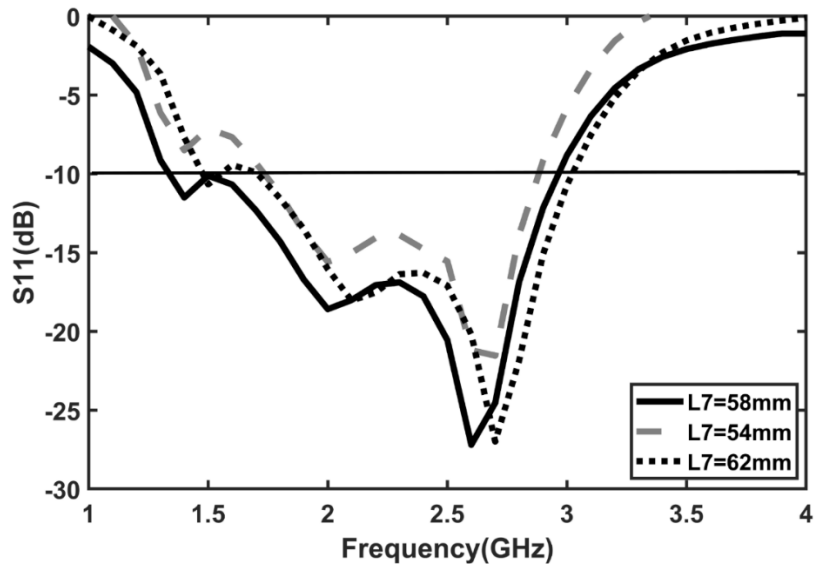
### ۳- مطالعات پارامتری

در این قسمت هدف بررسی تغییر پارامترهای کلیدی طراحی و تأثیر هر کدام در عملکرد نهایی آنتن است، که توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز فرکانس بالا<sup>۱</sup> انجام شده است. شکل ۲ منحنی تلفات بازگشتی آنتن را بر مبنای تغییرات طول L<sub>6</sub> نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، طول دهانه مورب صفحه بالایی قابلیت کنترل فرکانس تشدید را خواهد داشت. لازم به ذکر است به‌منظور دسترسی به جواب‌های بهینه فرآیند تکرار خطا در محاسبات صورت پذیرد. شکل ۳ منحنی پهنای باند امپدانس آنتن موردنظر را با تغییرات طول L<sub>7</sub> گزارش می‌دهد، همان‌طور که مشخص است طول قسمت قائم پله‌ای صفحه، تأثیر زیادی در پهنای باند امپدانس آنتن موردنظر را دارد، از همین شکل مشخص می‌گردد پهنای باند از ۱/۳ تا ۳ گسترده شده است و دارای نسبت (۸۰٪) است. پارامتر دیگری که تأثیری زیادی در تنظیم فرکانس تشدید و پهنای باند کلی آنتن را دارد فاصله افقی بین دو صفحه بالایی است که نقش خازن معادل را در مدار رزونانسی نهایی با توجه به تزویج دو صفحه ایفا می‌کند. شکل ۴ منحنی تغییرات افت برگشتی آنتن را بر مبنای تغییرات طول L<sub>8</sub> نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در تمامی نمودارهای قبلی که بر مبنای مطالعات پارامتریک به‌دست آمده است جواب‌های بهینه منحنی‌های مشکی رنگ هستند. شکل ۵ منحنی تغییرات افت برگشتی آنتن نهایی با استفاده از دو نرم‌افزار شبیه‌ساز نشان می‌دهد همان‌طور که بدیهی است فرایند طراحی آنتن دارای دقت قابل قبولی از لحاظ عملکرد است. شکل ۶ منحنی نسبت محوری آنتن با دو نرم‌افزار شبیه‌ساز را نشان می‌دهد، آنتن موردنظر در بازه فرکانسی ۱/۵ تا ۳ گیگاهرتز دارای خصیصه قطبی شدگی دایروی است که ویژگی اصلی این آنتن محسوب می‌شود. در ۹۰٪ باند کاربردی، خصیصه قطبش دایروی تواما محقق می‌گردد. لازم به ذکر است آنتن موردنظر دارای بهره و تشعشع پایدار در بازه فرکانسی موردنظر است. شکل ۷ منحنی تغییرات بهره آنتن با دو نرم‌افزار شبیه‌ساز برحسب فرکانس را نشان می‌دهد. همان‌طور که واضح است آنتن موردنظر دارای بیشینه بهره نسبی تقریباً ده دسیبل در بازه فرکانس کاربردی است. منحنی تغییرات نسبت محوری آنتن نیز در این شکل نشان داده شده است.

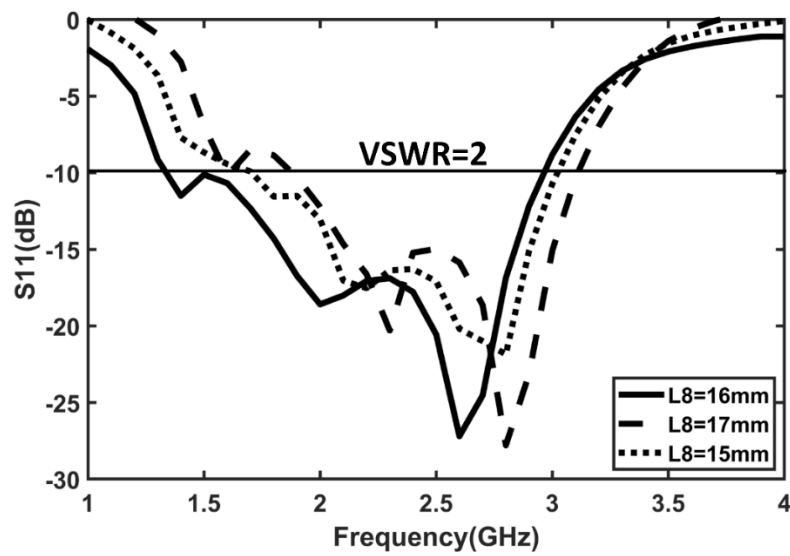


<sup>1</sup> HFSS

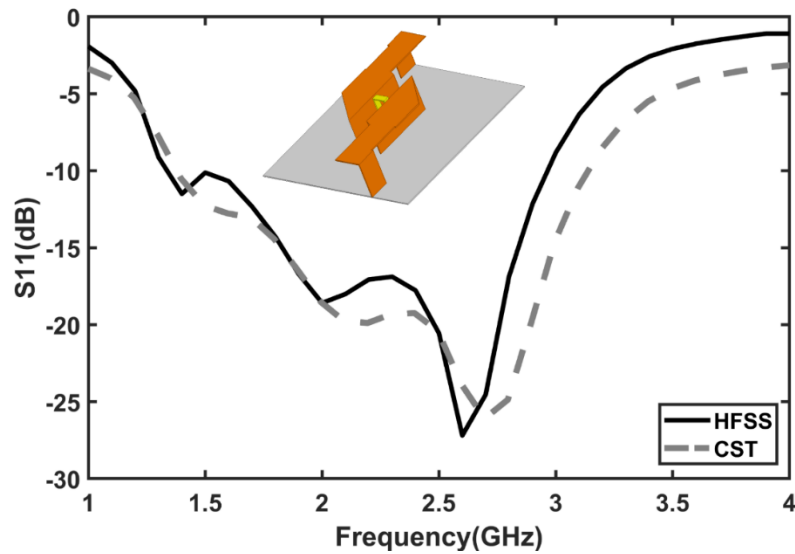
شکل ۲: منحنی تلفات بازگشتی برای تغییرات طول L6

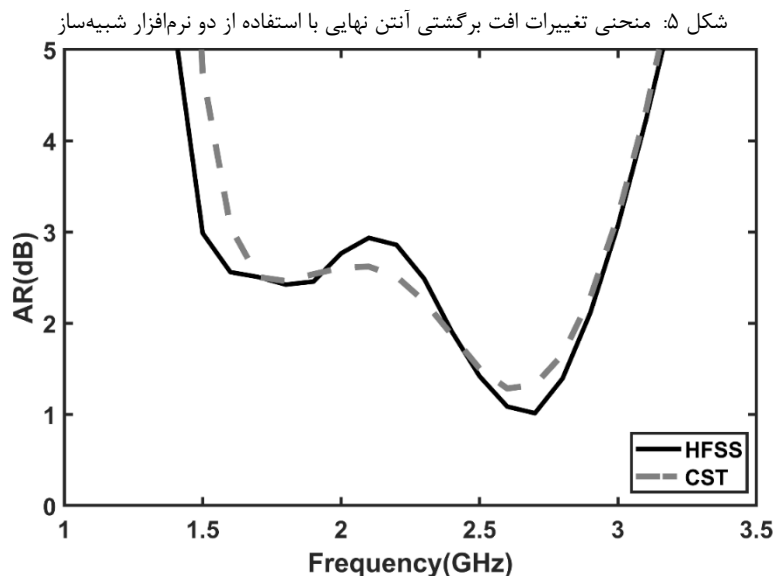


شکل ۳: منحنی تلفات بازگشتی برای تغییرات طول L7

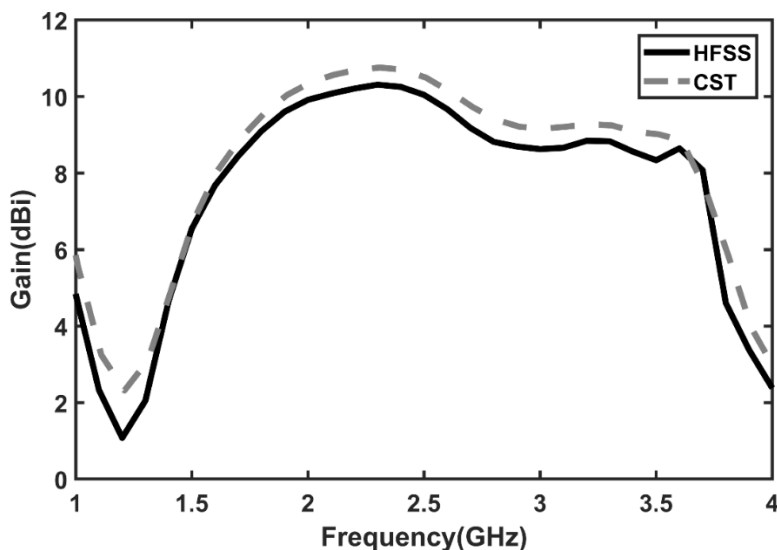


شکل ۴: منحنی تلفات بازگشتی برای تغییرات طول L8





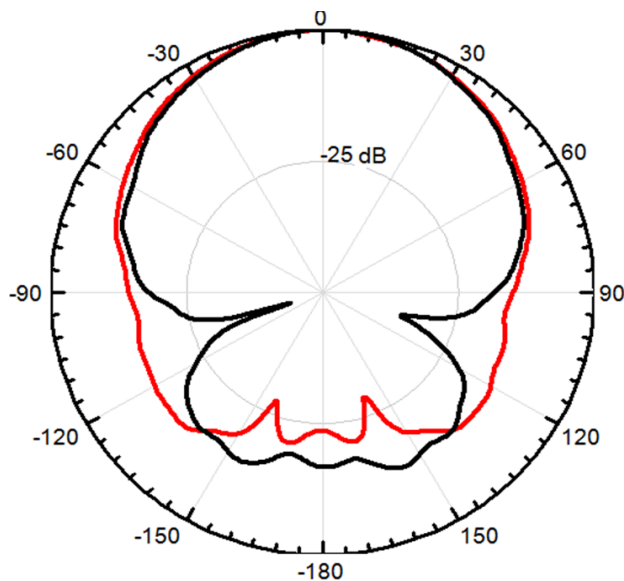
شکل ۶: منحنی نسبت محوری آنتن با دو نرم افزار شبیه ساز



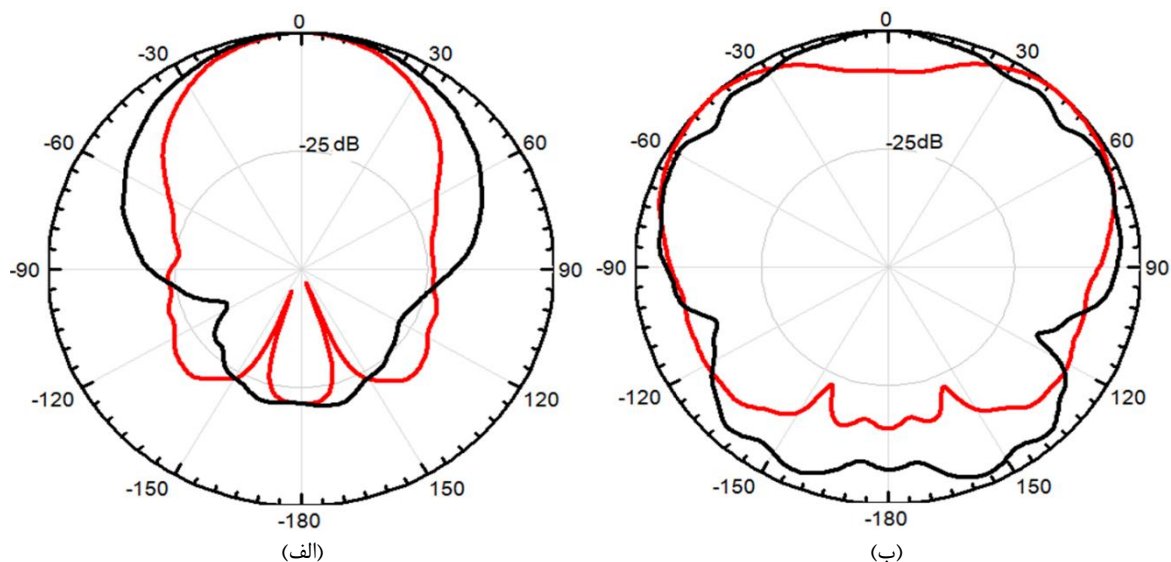
شکل ۷: منحنی تغییرات بهره آنتن با دو نرم افزار شبیه ساز بر حسب فرکانس

شکل ۸ منحنی الگوی تشعشعی آنتن را در فرکانس ۲/۶ گیگاهرتز و صفحات E و H نمایش می دهد. همان طور که مشخص است پهنای بیم اصلی در هر دو صفحه مذکور تقریباً شبیه به هم هستند که نشان دهنده عملکرد خوب آنتن است. همچنین مشخص می شود پوش منحنی های الگوی در صفحات E و H در حالت بردساید<sup>۱</sup> بوده و بسیار نزدیک به هم بوده و کاملاً بر هم مماس هستند. لازم به ذکر است که سطح گلبرگ پشتی در هر دو حالت بسیار کوچک بوده و پارامتر سنجش الگوی تشعشعی آنتن از وضعیت خوبی برخوردار بوده که این مقدار از ۱۰ دسیبل کمتر است. پارامتر دیگری که برای سنجش عملکرد آنتن های با خصیصه قطبش دایروی وجود دارد مطالعه بهره در حالت های چپ گرد و راست گرد است. شکل ۹ منحنی الگوهای تشعشعی قطبش دایروی چپ گرد و راست گرد را در فرکانس ۲/۶ نشان می دهد. از لحاظ زاویه بیم و سطح قطبش تقاطعی آنتن از وضعیت نسبی خوبی برخوردار است. از طرف دیگر الگوهای تشعشعی بردساید پایه دار و متقارن در باند فرکانسی کاربردی هستند. در جدول ۲ مقایسه پیشنهادی با کارهای گزارش شده قبلی آورده شده است که در پارامترهای اصلی آنتن پیشنهادی کارایی فوق العاده ای را ارائه می دهد.

<sup>1</sup> Broad side



شکل ۸: الگوی تشعشی آنتن پیشنهادی در دو صفحه میدان الکتریکی و مغناطیسی (مشکی : صفحه میدان الکتریکی و قرمز : صفحه میدان مغناطیسی)



شکل ۹: الگوی تشعشی بهره قطبی شدگی دایروی آنتن پیشنهادی الف) چپ گرد ب) راست گرد (مشکی : صفحه میدان الکتریکی و قرمز : صفحه میدان مغناطیسی)

جدول ۲: مقایسه پیشنهادی با کارهای گزارش شده قبلی

درصد خلوص قطبش دایروی گزارش نشده	پهنای باد نصف توان (درجه)	بهره (دسیبل)	درصد پهنای باند	
گزارش نشده	۶۵	۸/۵	۵۲	[۲۳]
۱۸	گزارش نشده	۹	۳۰/۳	[۲۴]
۲۲	۱۶۵	۸/۳۵	۶۰	[۲۵]
۹۰	۹۰	۱۰/۵	۸۰	این مقاله



## ۴- نتیجه‌گیری

ساختار جدیدی آنتن پهن باند شامل یک دوقطبی صفحه‌ای و یک رزوناتور عمودی ربع طول موج معرفی شد. ساختار موردنظر توسط یک خط نواری شکل  $\Gamma$  تحریک می‌شود. پهنای باند امپدانس  $80\%$  و بیشینه بهره  $10$  دسیبل استخراج گردید. خاصیت قطبی شدگی دایروی در  $90\%$  پهنای باند امپدانس آنتن محقق شد. ساختار معرفی شده دارای مزایایی همچون سهولت طراحی پهنای باند وسیع، سطح قطبی شدگی متقاطع کم، قطبش دایروی و الگوهای تشعشعی نسبتاً متقارن با سطح گلبرگ پشتی بسیار کم به دست می‌آید. بهره و عرض بیم آنتن در تمامی پهنای باند کاربردی آنتن تقریباً ثابت و پایدار است. آنتن موردنظر کاربردهای زیادی در صنعت مخابرات بی‌سیم مدرن خواهد داشت.

## مراجع

- [1] P. Mohammadi, M. H. Rezvani and T. Siah, "A circularly polarized wide-band magneto-electric dipole antenna with simple structure for BTS applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 105, pp. 92-97, 2019, doi: 10.1016/j.aeue.2019.04.008.
- [2] A. Baba, R. M. Hashmi, and K. P. Esselle, "Wideband gain enhancement of slot antenna using superstructure with optimised axial permittivity variation," *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 4, pp. 266-268, 2019, doi: 10.1049/el.2015.2694.
- [3] R. M. Hashmi, B. A. Zeb, and K. P. Esselle, "Wideband high-gain EBG resonator antennas with small footprints and all-dielectric superstructures," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 6, pp. 2970-2977, June 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.2314534.
- [4] R. M. Hashmi and K. P. Esselle, "A class of extremely wideband resonant cavity antennas with large directivity-bandwidth products," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 2, pp. 830-835, Feb. 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2782749.
- [5] N. Wang, J. Li, G. Wei, L. Talbi, Q. Zeng, and J. Xu, "Wideband fabry perot resonator antenna with two layers of dielectric superstrates," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 229-232, 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.2360703.
- [6] Y. Ge, Z. Sun, Z. Chen, and Y. Y. Chen, "A high-gain wideband low-profile fabry-perot resonator antenna with a conical short horn," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1889-1892, 2021, doi:10.1109/APUSNCURSINRSM.2021.8072430.
- [7] B. P. Chacko, G. Augustin, and T. A. Denidni, "FPC antennas : C-band point-to-point communication systems," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 56-64, Feb. 2019, doi:10.1109/TMTT.2019.2830396.
- [8] F. Wu and K. M. Luk, "Wideband high-gain open resonator antenna using a spherically modified, second-order cavity," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 4, pp. 2112-2116, April 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2782749.
- [9] A. Baba, R. M. Hashmi, and K. P. Esselle, "Achieving a large gain-bandwidth product from a compact antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 7, pp. 3437-3446, July 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2953861.
- [10] M. Kovaleva, D. Bulger, B. A. Zeb, and K. P. Esselle, "Cross-entropy method for electromagnetic optimization with constraints and mixed variables," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 10, pp. 5532-5540, Oct. 2017. doi: 10.1109/TAP.2017.2740974.
- [11] M. Khalily, R. Tafazolli, P. Xiao, and A. A. Kishk, "Broadband mm-wave microstrip array antenna with

- improved radiation characteristics for different 5G applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 9, pp. 4641–4647, Sep. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2845451.
- [12] H. Xu, J. Zhou, K. Zhou, Q. Wu, Z. Yu, and W. Hong, “Planar wide- band circularly polarized cavity-backed stacked patch antenna array for millimeter-wave applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 10, pp. 5170–5179, Oct. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2862345.
- [13] F. Wu and K. M. Luk, “Wideband high-gain open resonator antenna using a spherically modified, second-order cavity,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 4, pp. 2112–2116, April 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2782749.
- [14] Y. Zhang, W. Hong, and R. Mittra, “45 GHz wideband circularly polarized planar antenna array using inclined slots in modified short-circuited SIW,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 3, pp. 1669–1680, Mar. 2019, doi:10.1155/2021/9955502.
- [15] L. Zhang et al., “Wideband high-efficiency circularly polarized SIW-fed S-dipole array for millimeter-wave applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 2422–2427, Mar. 2020, doi:10.1109/LAWP.2021.3092139.
- [16] J. Xu, W. Hong, Z. H. Jiang, H. Zhang, and K. Wu, “Low-profile wide- band vertically folded slotted circular patch array for K a-band applica- tions,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 9, pp. 6844–6849, Sep. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075495.
- [17] S. Sedghi, S. Shafei, A. Kalami and T. Aribi, “Small Monopole Antenna for IEEE 802.11a and X-Bands Applications Using Modified CBP Structure,” *Wireless Pers Commun*, vol.80, pp.859–865, 2015, doi: 10.1007/s11277-014-2045-z.
- [18] T. Li and Z. N. Chen, “Wideband sidelobe-level reduced K a-band meta surface antenna array fed by substrate-integrated gap waveguide using characteristic mode analysis,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1356–1365, Mar. 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2948492.
- [19] J. Yin, Q. Wu, C. Yu, H. Wang, and W. Hong, “Broadband symmetrical E-shaped patch antenna with multimode resonance for 5G millimeter- wave applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 7, pp. 4474–4483, Jul. 2019, doi: 10.1002/ett.4426.
- [20] F. Heidari, Z. Adelpoure and N. Parhizgar, “Simulation of Leaky Wave Antenna with Coscant Squared Pattern Using Genetic Algorithm,” *Journal communication Engineering*, vol.11, no. 42, pp. 69-76, 2022 (in Persian).
- [21] G.-H. Sun and H. Wong, “A planar millimeter-wave antenna array with a pillbox-distributed network,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 5, pp. 3664–3672, May 2020, doi: 10.1155/2021/2286011.
- [22] T. Aribi, T. Sedghi and R. K. Mohammad Lou, “Multi-band compact MIMO Antenna for new generations of mobile applications & IoT,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol.12, no.45, pp. 20-27, 2022 (in Persian).
- [23] D.L. Wen, D. Z. Zheng and Q.X. Chu, “A wideband differentially fed dual-polarized antenna with stable radiation pattern for base stations,” *IEEE Trans Antennas Propag.*, vol.65, pp.2248-2255, 2017, doi:10.21203/rs.3.rs-327641/v1.
- [24] D. Ni, S. Yang, Y. Chen and Z. Song, “Extremely low-profile wideband dual-polarized microstrip antenna for micro-base-station applications,” *Int J RF Microw C E.*, vol.27, pp.1-8, 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.888398.
- [25] M. Rezvani and P. Mohammadi, “A dual-polarized reflector antenna with  $\lambda/2$  printed dipoles for femtocell applications,” *J Instrum*, vol.14, p.02004, 2019, doi: 10.21203/rs.3.rs-268254/v1.