

یک آنتن میکرواستریپ فرکتالی کوچک شده با عملکرد چندفرکانسی

شاهرخ جم و آرش مهبودی

روش‌ها اکثراً مراحل طراحی و ساخت را پیچیده می‌کنند و علاوه بر این پس از کوچک‌سازی آنتن، مشخصات تشعشی به شدت افت می‌کند و باعث ناکارآمدی آنتن می‌شود. همچنین با این روش‌ها تنها ابعاد کوچک می‌شود ولی تعداد فرکانس تشدید یا پهنای باند آنچنان تغییری نمی‌کند. در این مقاله تلاش کردیم تا بر اساس ساختارهای فرکتالی، آنتنی را طراحی کنیم که علاوه بر ابعاد آن مشخصات تشعشی نیز مطلوب باشد. برترین مزیت استفاده از ساختارهای فرکتالی نسبت به سایر روش‌های کوچک‌سازی، آسان‌تر بودن و ارزان‌تر بودن در ساخت است. بدین معنی که نه پیچیدگی‌های دیگر روش‌ها را دارد و نه نیاز به هزینه زیاد برای ساخت آنتن. همچنین با استفاده از این ساختارها می‌توان تعداد فرکانس تشدید و یا پهنای باند را افزایش داد. در ادامه توضیح می‌دهیم که فرکتال‌ها چگونه می‌تواند ابعاد را کوچک و تعداد فرکانس تشدید را افزایش دهند.

۲- تئوری

اگر یک آنتن به همراه اجزا و مؤلفه‌هایش در یک کره فرضی به شعاعی برابر با بزرگ‌ترین بعد آنتن محصور شود و بتواند حجم موجود در فضا را به طور مؤثرتری پر کند، پهنای باند آنتن می‌تواند بهبود یابد [۱۲]. در شکل ۱ نمونه‌ای از این موضوع نمایش داده شده است. یکی از انواع آنتن‌ها که می‌تواند فضای درون این کره را به طور مؤثرتر و بهتری پر کرده و به کار گیرد، آنتن فرکتال است. این آنتن‌ها مبتنی بر مفهوم فرکتال هستند که یک هندسه تولیدشونده تکراری و ابعاد جزئی و کوچک دارند که توسط مندلبرت معرفی شد [۱۳]. ویژگی‌های فرکتال که باعث شده از آن در طراحی آنتن‌ها استفاده شود عبارتند از:

الف) خاصیت خودمتمشابهی

خاصیت خودمتمشابهی^۳ به معنای توانایی فرکتال‌ها در محصور کردن یک منحنی با طول بی‌نهایت در یک محیط محدود می‌باشد. این خاصیت فرکتال‌ها آنها را برای طراحی آنتن‌ها با پهنای باند بسیار بزرگ واجد شرایط می‌کند و این امکان را فراهم می‌کند تا آنتن بتواند عملکردی چندباند داشته باشد. به دلیل این که وقتی یک قسمت از آنتن به تشدید می‌افتد، به علت تشابهی که به کل دارد و تنها در اندازه متفاوت است، آنتن می‌تواند در یک بازه فرکانسی دیگر تشدید کند [۱۴]. Puenete توانایی چندباند شدن فرکتال‌ها را به وسیله مطالعه رفتار تک قطبی و دوقطبی سرپینسکی اثبات کرد [۱۵].

ب) خاصیت فضاپرکنی

یکی از ویژگی‌های خاص و منحصر به فرد آنتن‌های فرکتال، خاصیت فضاپرکنی^۴ آنهاست. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، هرچه یک آنتن

چکیده: کاربردهای زیاده‌تر و متنوع‌تر سیستم‌های مخابراتی نیاز به استفاده بیشتری از تمامی طیف الکترومغناطیسی را الزامی کرده است و همچنین به وجود آمدن سیستم‌های چندباند نیاز به آنتن‌هایی با قابلیت تشدید در چند فرکانس را افزایش داده است. امروزه با توجه به پیشرفت سیستم‌های بی‌سیم استفاده از آنتن‌های سبک، ساده، کوچک و ارزان که بتواند چند طیف فرکانسی سیستم را پوشش بدهد یک نیاز اساسی است. در این مقاله آنتنی با ایده فرکتالی میکرواستریپی پیشنهاد و طراحی می‌شود که با ابعادی کوچک و سبک و همچنین قیمتی ارزان بتواند در چندین فرکانس تشدید کند. این آنتن در محدوده فرکانسی حدود یک گیگاهرتز تا ده گیگاهرتز دارای پنج فرکانس تشدید است. نتایج اندازه‌گیری آنتن ساخته شده با نتایج شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار HFSS انجام گرفته، تطبیق خوبی را نشان می‌دهد. همچنین این آنتن دارای پترن مناسب و قطبش دایروی است که کاربرد آن را بیشتر می‌کند.

کلیدواژه: آنتن فرکتال، کوچک‌سازی، چندفرکانسی، آنتن میکرواستریپ، کوپلینگ مجاورتی.

۱- مقدمه

میان ابعاد آنتن و طول موج سیگنال، ارتباط تنگاتنگی وجود دارد که این امر معمولاً به عنوان یکی از قیود دست و پا گیر در طراحی آنتن‌ها به شمار می‌آید [۱]. هنگامی که ابعاد یک آنتن خیلی کوچک‌تر از طول موج عملکرد آن ساخته شود، راندمان آن آنتن به شدت کم و مقاومت تشعشی آن کاهش می‌یابد، در حالی که به طور نسبی انرژی راکتیو ذخیره شده در مجاورت آنتن به شدت افزایش می‌یابد. هر دو پدیده یک آنتن کوچک را برای تطبیق کردن با مدار تغذیه دچار مشکل می‌کنند و چنانچه تطبیق امپدانس صورت گیرد، آنتن دارای Q زیاد و پهنای باند خیلی باریک خواهد شد.

مشخصه‌های تشعشی آنتن‌ها (از قبیل الگوی تشعشی، امپدانس، بهره و ...) به فرکانس بسیار حساس هستند [۲] و میزان تغییر این مشخصه‌ها به عنوان تابعی از فرکانس، به پهنای باند آنتن بستگی دارد [۳] و [۴].

تاکنون روش‌های گوناگونی برای کاهش ابعاد آنتن از قبیل استفاده از دی‌الکتریک با ضریب نفوذپذیری بالا [۲]، استفاده از اتصال کوتاه برای زیرلایه‌های نازک [۵]، شکاف‌گذاری در صفحه تشعشی آنتن [۶]، شکاف‌گذاری در صفحه زمین [۷]، استفاده از آنتن L شکل معکوس (PIL) و یا انواع دیگر آنتن‌های تاشده^۲ ارائه شده است [۸] تا [۱۱]. این

این مقاله در تاریخ ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱ آبان ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

شاهرخ جم، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، (email: jam@sutech.ac.ir)

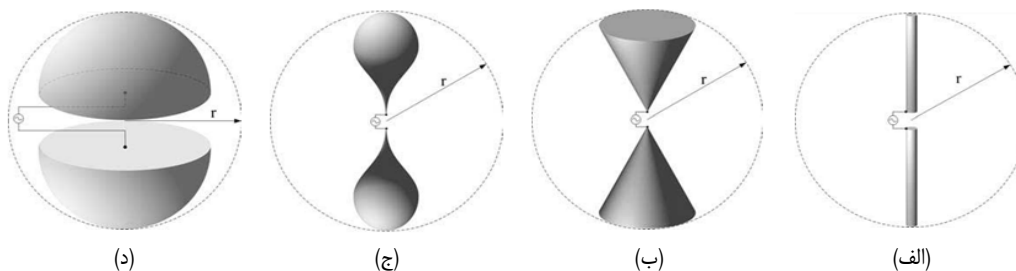
آرش مهبودی، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، (email: mehboodi@sutech.ac.ir)

3. Self Similarity

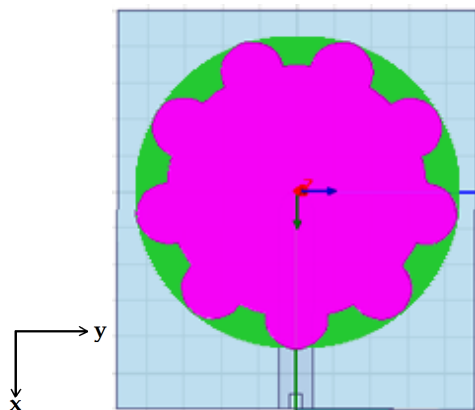
4. Space Filling

1. Planar Inverted-L Patch

2. Folded Patch



شکل ۱: ترکیبات دوقطبی و پهنای باند معادل متناظر [۲]، (الف) پهنای باند باریک، (ب) پهنای باند متوسط، (ج) پهنای باند متوسط و (د) پهنای باند پهن.



شکل ۳: آنتن دایروی اولیه و آنتن پیچ تغییر یافته در لبه آن.

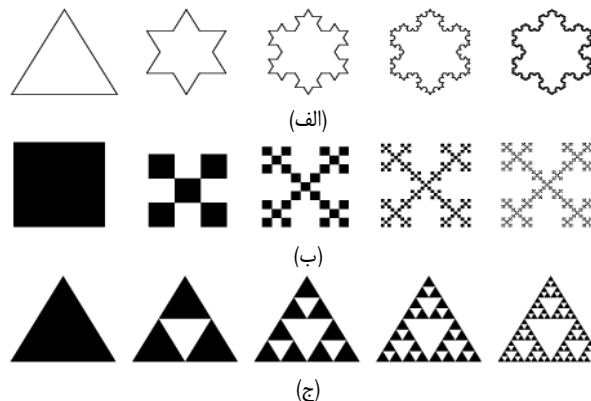
mm ۲۲/۶ است. مشخصات مورد (لایه) تغذیه مشابه مورد پیچ تشعشی است که متشکل از یک خط میکرواستریپی ۵۰ اهمی و با صفحه زمین که به کانکتور SMA متصل شده است می‌باشد. در ادامه سعی شده که با استفاده از تکنیک‌های فرکتالی به پاسخ فرکانسی مطلوبی دست یافت و فرکانس تشدید نیز کاهش یابد. انتخاب فرکانس‌های مختلف در این نوع ساختار با ابعاد کلی آنتن و ابعاد تکرارهای داخلی فرکتال نسبت مستقیم دارد.

۳-۱ افزایش محیط پیچ

آنتن پیچ دایروی اولیه با افزودن دایره‌های کوچک‌تر روی لبه پیچ به آنتن بهبود یافته‌ای مطابق ساختار نشان داده شده در شکل ۳ تبدیل شده است. این ساختار جدید پیچ توسط شکل پیچ دایروی اولیه محاط شده که با رنگ سبز در شکل مشخص گردیده است. با انجام این کار مساحت آنتن کاهش و محیط آن افزایش می‌یابد. افزایش محیط یعنی افزایش طول الکتریکی آنتن که منجر به کاهش فرکانس تشدید می‌شود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده S_{11} که در شکل ۴ ارائه شده است، مشاهده می‌گردد که آنتن در فرکانس ۲/۸ GHz تشدید می‌کند و نسبت به حالت قبل که دایروی ساده بود در فرکانس پایین‌تری تشدید می‌نماید که این پدیده به دلیل زیاد شدن طول الکتریکی آنتن است. اما کاهش فرکانس به تنهایی جهت رسیدن به یک پاسخ فرکانسی مطلوب کافی نبوده و باید روشی اعمال کرد که آنتن در تعداد فرکانس‌های بیشتری تشدید کند. بنابراین بهترین گزینه برای افزایش تعداد فرکانس‌های تشدید، استفاده از فرکتال‌ها می‌باشد یا به عبارتی تکرار شکل آنتن با ابعاد کوچک‌تر در خود ساختار.

۳-۲ ایجاد تکرار اول در آنتن

بهترین شیوه برای فرکتال کردن شکل پیچ، ایجاد تکرارها در خود شکل است، بدین صورت که تکرار فرکتال با یک ضریب کوچک‌تر در داخل خود ساختار ایجاد شود. یکی از معایبی که فرکتال‌ها و مخصوصاً این نوع



شکل ۲: ساختارهای فرکتالی متداول، (الف) حلقه کخ، (ب) مینکوسکی و (ج) مثلث سرپینسکی.

بتواند فضای دایره دور خود را بیشتر پر کند، پهنای باند بیشتری هم خواهد داشت.

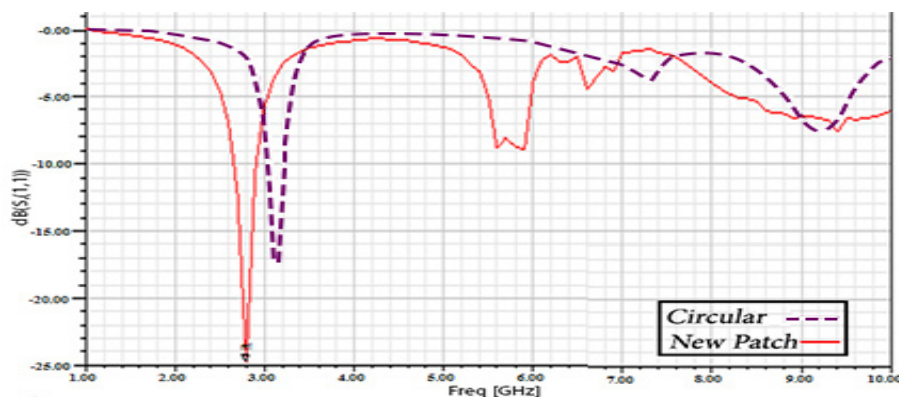
می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تکرار فرکتال، مساحت حداکثر محدود به مساحت دایره می‌شود اما محیط آن به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. این چیزی است که در شکل‌های اقلیدسی انتظارش را نداشتیم چون در این اشکال، با افزایش محیط، مساحت هم افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۲ چند نمونه از فرکتال‌های معروف به همراه تکرارهایشان آورده شده و قابل مشاهده است که با افزایش تکرار، محیط رو به افزایش و مساحت رو به کاهش می‌باشد.

۳-۳ طراحی آنتن

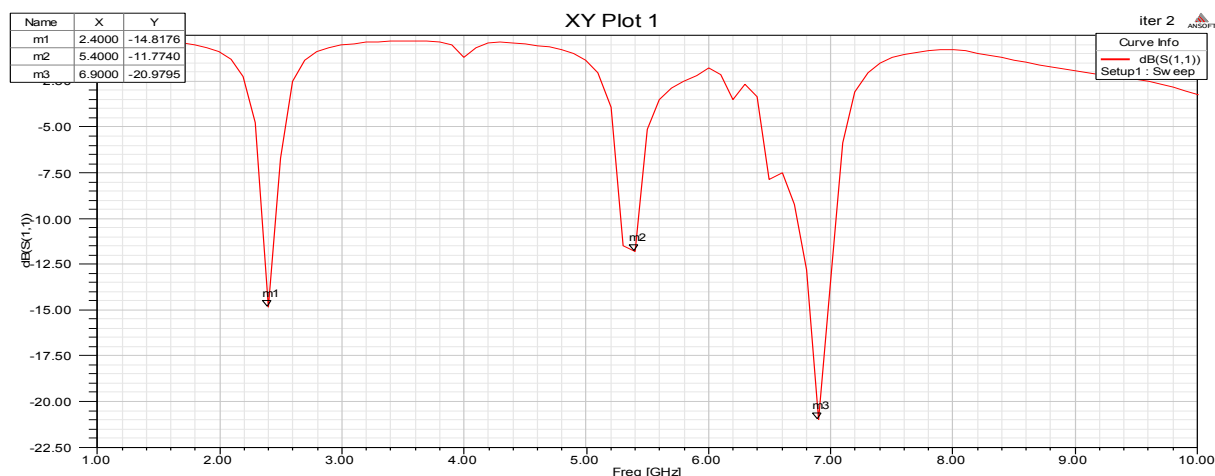
در این مقاله با توجه به نیاز سیستم‌های فرستندگی و گیرندگی در مخابرات امروزی به داشتن آنتن‌های با ابعاد کوچک، سبک و ارزان بر پایه ساختارهای میکرواستریپی، آنتنی پیشنهاد و طراحی می‌شود که در آن بتوان به اهداف چندتشدید و فشرده‌سازی دست یافت.

رایج‌ترین شکل پیچ‌های آنتن‌های میکرواستریپی، دایروی و مستطیلی می‌باشند که انواع تحلیل‌ها بر روی آنها انجام گرفته است. در این تحقیق، فرایند طراحی با یک شکل پیچ ساده شروع می‌شود و در نهایت آنتن مورد نظر و مطلوب به دست خواهد آمد. در مقایسه‌هایی که بین پیچ مستطیلی و دایروی انجام گرفته است، عموماً برتری و تمایل به بکارگیری از پیچ دایروی در ساخت برخی از آنتن‌ها بوده که بستگی به نوع کاربرد آن دارد. به عنوان نمونه در [۱۶] و [۱۷] نشان داده شده که آنتن با پیچ دایروی مشخصات تشعشی بهتری نسبت به پیچ مستطیلی دارد.

آنتن پایه این تحقیق یک آنتن پیچ دایره‌ای در باند S است که روی زیرلایه FR۴ و با ضخامت ۱/۶ mm با ابعاد $5.5 \times 4.8 \text{ cm}^2$ بدون صفحه زمین طراحی می‌شود و لایه (بورد) تغذیه نیز مشابه لایه آنتن است. این آنتن مشابه با دیگر آنتن‌های ساده میکرواستریپی در یک فرکانس تشدید می‌کند. فرکانس تشدید آنتن ۳/۱ GHz و شعاع این آنتن



شکل ۴: نمودار شبیه‌سازی S_{11} برای آنتن با پیچ دایروی ساده و پیچ تغییر یافته در شکل ۳.



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی S_{11} آنتن با تکرار اول ساختار شکل ۵.

آنتن اولیه ۰/۷ است. شکل ۵ آنتن با تکرار اول و شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی S_{11} آن را نشان می‌دهد.

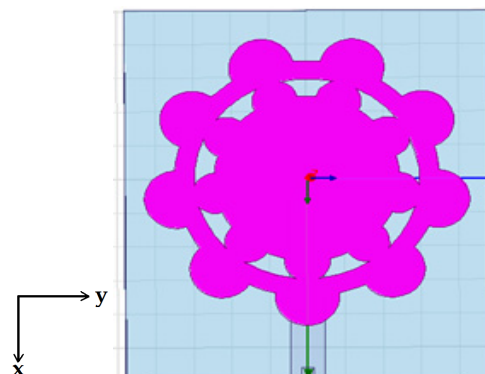
با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که به دلیل ایجاد تکرار در ساختار پیچ، سه فرکانس تشدید ایجاد شده و اولین فرکانس تشدید به فرکانس پایین‌تری نسبت به حالت قبل شیفت پیدا کرده است. فرکانس‌های تشدید در این حالت ۲/۴ GHz، ۵/۴ GHz و ۶/۹ GHz می‌باشد.

۳-۳ آنتن با تکرار دوم

در این مرحله تکرار را بار دیگر بر روی پیچ اعمال می‌کنیم. با توجه به ساختار جدید پیچ در این مرحله، انتظار می‌رود تعداد فرکانس تشدید بار دیگر افزایش یابد. شکل ۷ ساختار آنتن در تکرار دوم را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، طبق انتظار تعداد فرکانس‌های تشدید به چهار فرکانس افزایش یافته و همچنین پایین‌ترین فرکانس تشدید، به فرکانس کمتری نسبت به حالت قبل شیفت پیدا کرده است. به منظور کاهش بیشتر اولین فرکانس تشدید بایستی سعی شود محیط آنتن افزایش یابد که این تغییر در قسمت بعد بیان می‌گردد.

۳-۴ آنتن پیچ نهایی

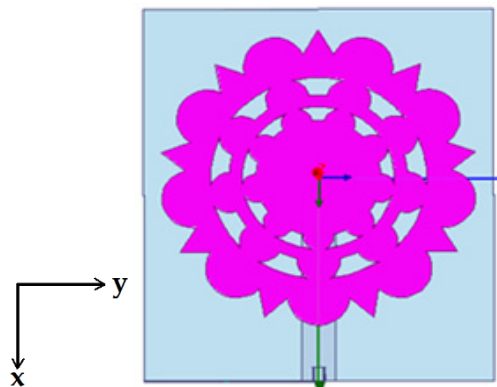
در مرحله بعدی به منظور افزایش محیط و همچنین افزایش مساحت پیچ شکل ۷، ساختار بهبود یافته‌ای که در شکل ۹ نشان داده شده را ارائه می‌دهیم. در این ساختار بهبود یافته از مثلث‌های کوچک برای پرکردن دایره محاطی استفاده شده که به عبارتی لبه آنتن کنگره‌ای شده است. این افزایش مساحت باید در دایره محاطی پیچ رخ دهد و اگر خارج از دایره این اتفاق رخ دهد، باعث افزایش فرکانس تشدید خواهد شد.



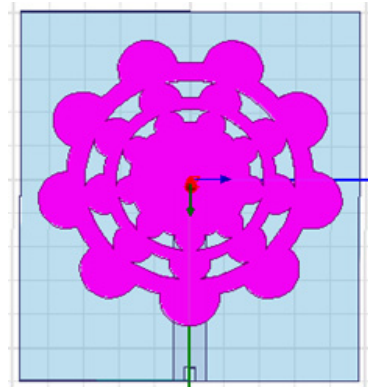
شکل ۵: ساختار آنتن پیشنهادی در تکرار اول.

از ساختارهای فرکتالی دارند این است که مساحت ناحیه فلزی زیادی که بستر توزیع جریان تشعشعی روی آنتن است را از دست می‌دهند. همان طور که بیان شد، فرکتال‌ها این توانایی را دارند که تقریباً به محیطی با طول بی‌نهایت و مساحتی نزدیک به صفر برسند. درست است که با افزایش محیط، ابعاد آنتن و یا فرکانس تشدید کاهش می‌یابد اما با از دست دادن بیش از حد مساحت، برخی از مشخصات تشعشعی آنتن از جمله بهره تا حد زیادی از دست می‌رود. برای رفع این مشکل باید مصالحه‌ای بین مساحت و محیط ایجاد شود و به عبارتی بایستی به میزانی محیط افزایش و مساحت کاهش یابد که حتی‌الامکان مشخصات تشعشعی تخریب نگردیده و آنتن قابل بهره‌برداری باشد.

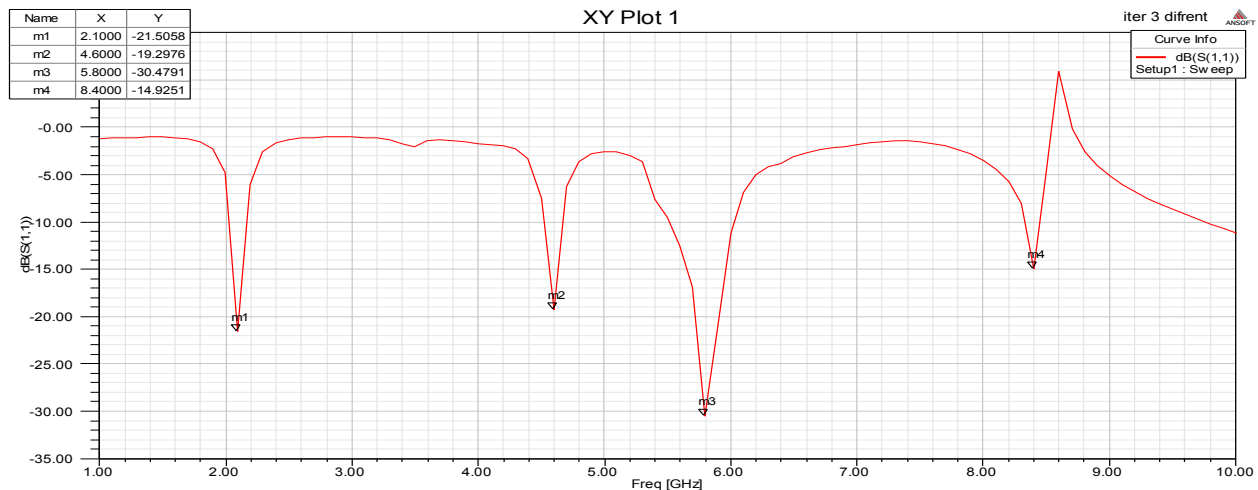
به همین علت در ارائه آنتن پیشنهادی در این مرحله لبه‌های تکرار با پیچ اصلی درگیر شده است. با این روش محیط و طول الکتریکی افزایش یافته و نیز مساحت کمتری از دست رفته است. نسبت تکرار ایجاد شده به



شکل ۹: آنتن فرکتال با افزایش طول الکتریکی توسط مثلث در لبه.



شکل ۷: ساختار آنتن پیشنهادی در تکرار دوم.

شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی S_{11} آنتن با تکرار دوم ساختار شکل ۷.

نیز می‌گردد.

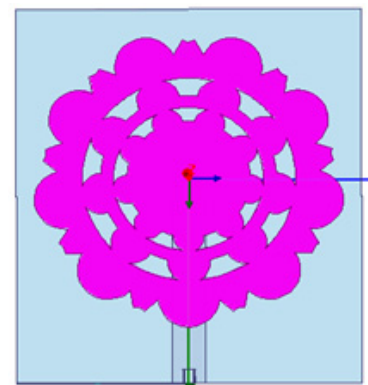
نتایج شبیه‌سازی S_{11} این آنتن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ این آنتن در پنج فرکانس تشدید می‌کند. کوچک‌ترین فرکانس تشدید ۱٫۹ GHz است و فرکانس‌های تشدید بعدی ۴٫۴ GHz، ۵٫۶ GHz، ۷٫۸ GHz و ۸٫۵ GHz و پهنای باند هر کدام به ترتیب ۱۳۰، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰ مگاهرتز می‌باشد.

بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در طراحی نهایی، تعداد فرکانس تشدید آنتن به پنج فرکانس افزایش داده می‌شود و علاوه بر این موضوع، فرکانس تشدید اولیه تا حد زیادی کاهش می‌یابد که نشان از کارآمدی مناسب فرکتال دارد.

۴- آنتن ساخته‌شده و مقایسه نتایج

برای بررسی میزان دقت در طراحی آنتن پیشنهادی، نمونه‌ای از این آنتن ساخته شد. شکل ۱۲ تصاویری از آنتن ساخته‌شده را نشان می‌دهد که به دلیل استفاده از زیرلایه FR۴، ارزان بوده و به همین دلیل می‌تواند استفاده صنعتی از آن را توجیه‌پذیر سازد.

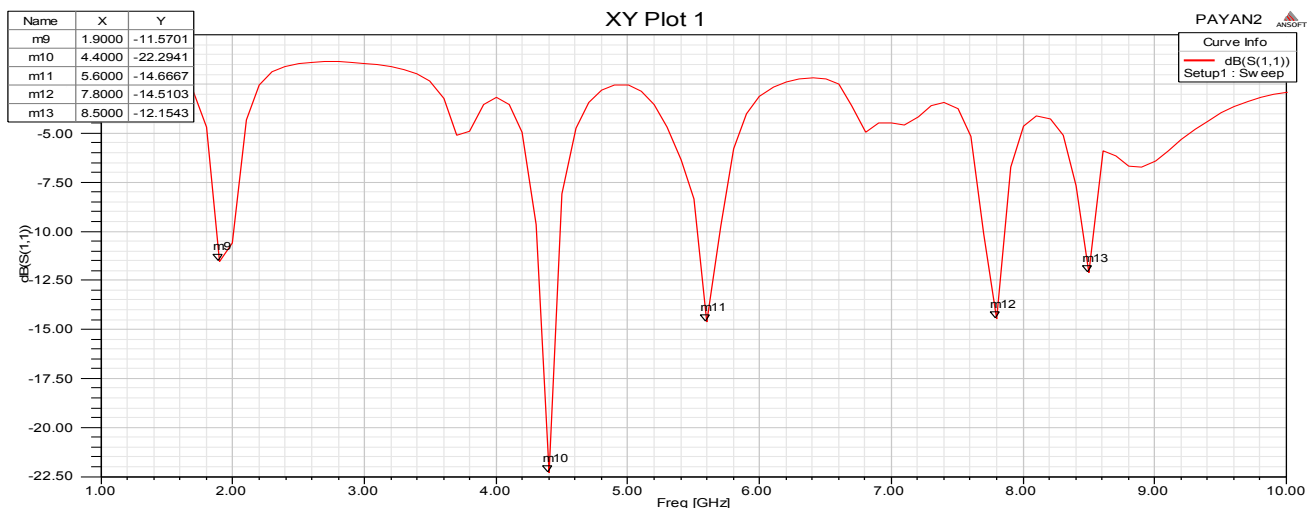
آنتن توسط مرکز اندازه‌گیری و اندازه‌شناسی شرکت صنایع الکترونیک شیراز مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفت. خروجی نتایج اندازه‌گیری S_{11} دستگاه برای این آنتن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی کامل‌تر آنتن طراحی‌شده سعی گردید که تمام موارد ساخت در مرحله شبیه‌سازی در نرم‌افزار نیز لحاظ گردد از جمله بریدگی ایجادشده بر روی زیرلایه پیچ، اندازه کانکتور و ... از طرفی دیگر در شبیه‌سازی، سخت‌ترین شرایط برای آنتن در نظر گرفته شد تا حتی‌الامکان وضعیت آنتن در مرحله ساخت، کامل‌تر شبیه‌سازی شود.



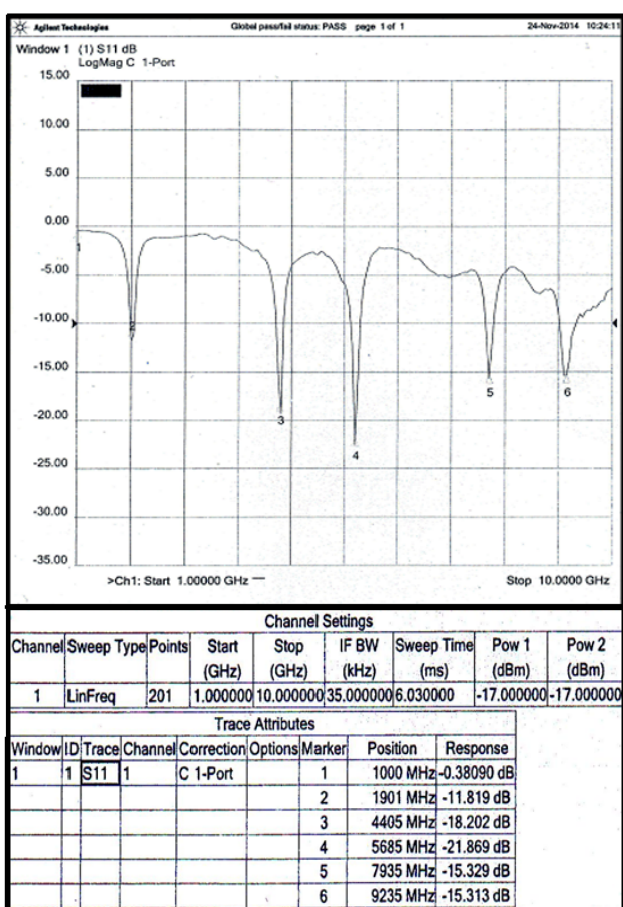
شکل ۱۰: ساختار آنتن نهایی طراحی‌شده.

از طرفی کنگره‌ای بودن دور لبه پیچ و همچنین فضاهای خالی بر روی پیچ که هر کدام مستقل از یکدیگر شده، از مهم‌ترین دلایل قطبش دایروی در این آنتن می‌باشد. به این موضوع در ادامه مقاله در مبحث نسبت محوری آنتن پرداخته می‌شود.

اما همان‌گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد، نوک مثلث‌ها کمی از دایره محاطی خارج شده‌اند و بنابراین برای رفع این مشکل مطابق با ساختار آنتن در شکل ۱۰، قوسی در نوک هر کدام از مثلث‌ها ایجاد می‌گردد. البته به جای این عمل می‌توان از مثلث‌های کوچک‌تری نیز استفاده کرد که در این صورت نتایج به دست آمده تأثیری چندانی به وجود نخواهد آورد زیرا در این حالت مساحت و محیط کمتری به پیچ اضافه می‌شود. با ایجاد این قوس در نوک مثلث‌ها، هم محیط کمی افزایش پیدا کرده و هم این که باعث بهبود چند صد درصدی در بهره



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی S_{11} آنتن نهایی.



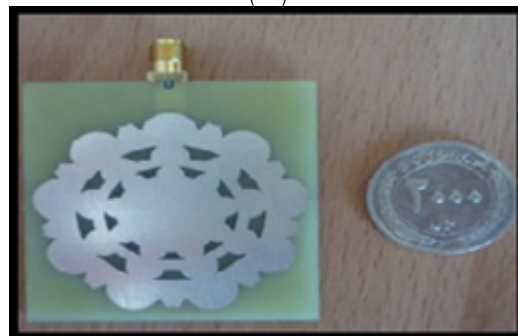
شکل ۱۳: نتایج اندازه‌گیری S_{11} آنتن ساخته شده.

فرکانسی نسبت محوری زیر ۱ dB می‌باشد. داشتن قطبش دایروی^۲ نشان‌دهنده افزایش نرخ اطلاعات ارسالی و دریافتی توسط آنتن می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی پترن تشعشی این آنتن که با نرم‌افزار HFSS انجام گرفته، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای مشخص‌تر شدن کیفیت عملکرد و خصوصیات این آنتن در مقایسه با کار مشابهی مانند [۱۹] می‌توان جدول ۱ را مشاهده نمود.

2. Circular Polarization



(الف)



(ب)

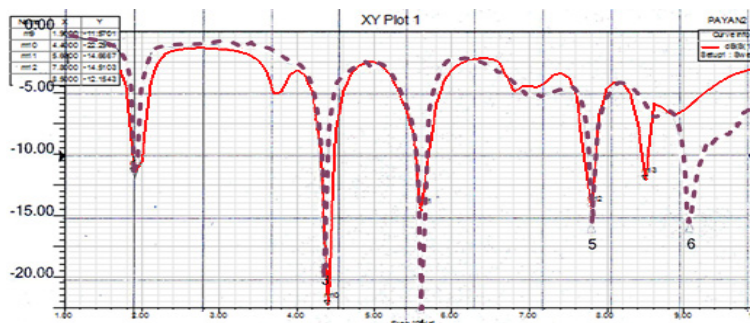
شکل ۱۲: تصویر آنتن ساخته شده، (الف) بورد آنتن و بورد تغذیه و (ب) آنتن مونتاژ شده.

یکی دیگر از مواردی که در مورد آنتن پیشنهادی باید به آن اشاره کرد این است که طول و عرض زیرلایه نسبت به ابعاد پیچ کوچک است و پیچ بسیار به لبه‌ها نزدیک است. این مورد اغلب باعث تخریب عملکرد آنتن می‌شود اما با توجه به شکل پیچ و ملاحظات دیگر، مشاهده می‌گردد که پاسخ فرکانسی آنتن حفظ شده است.

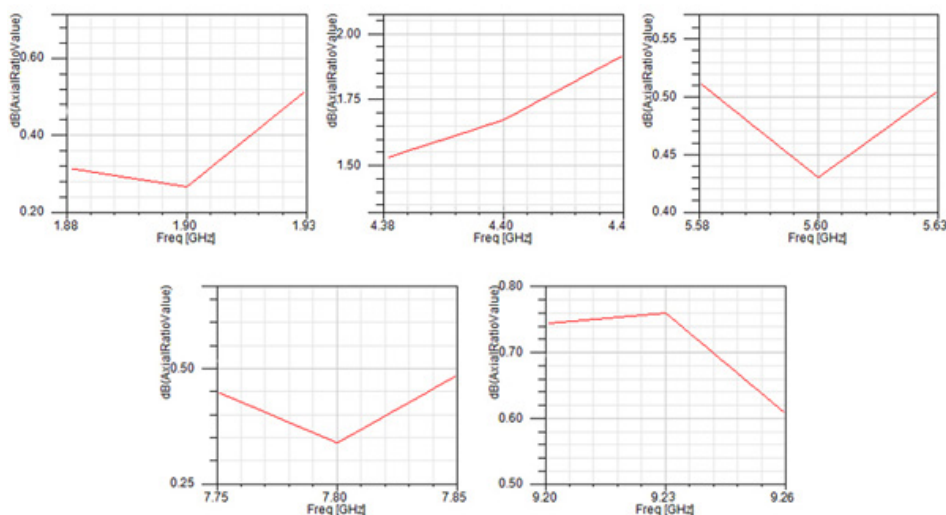
در شکل ۱۴ سعی شده که نتایج شبیه‌سازی و نتایج اندازه‌گیری در یک نمودار مشترک جهت مقایسه بهتر آنها ارائه گردد.

یکی دیگر از مشخصات این آنتن، نسبت محوری^۱ آن است. شکل ۱۵ نتایج شبیه‌سازی شده نسبت محوری آنتن را نشان می‌دهد و همان طور که مشاهده می‌شود در تمام محدوده بازه‌های فرکانس عملکردی آنتن (فرکانس‌های تشدید)، نسبت محوری زیر ۳ dB می‌باشد که نشان‌دهنده قطبش دایروی خوب این آنتن است [۱۸] هر چند که اکثر بازه‌های

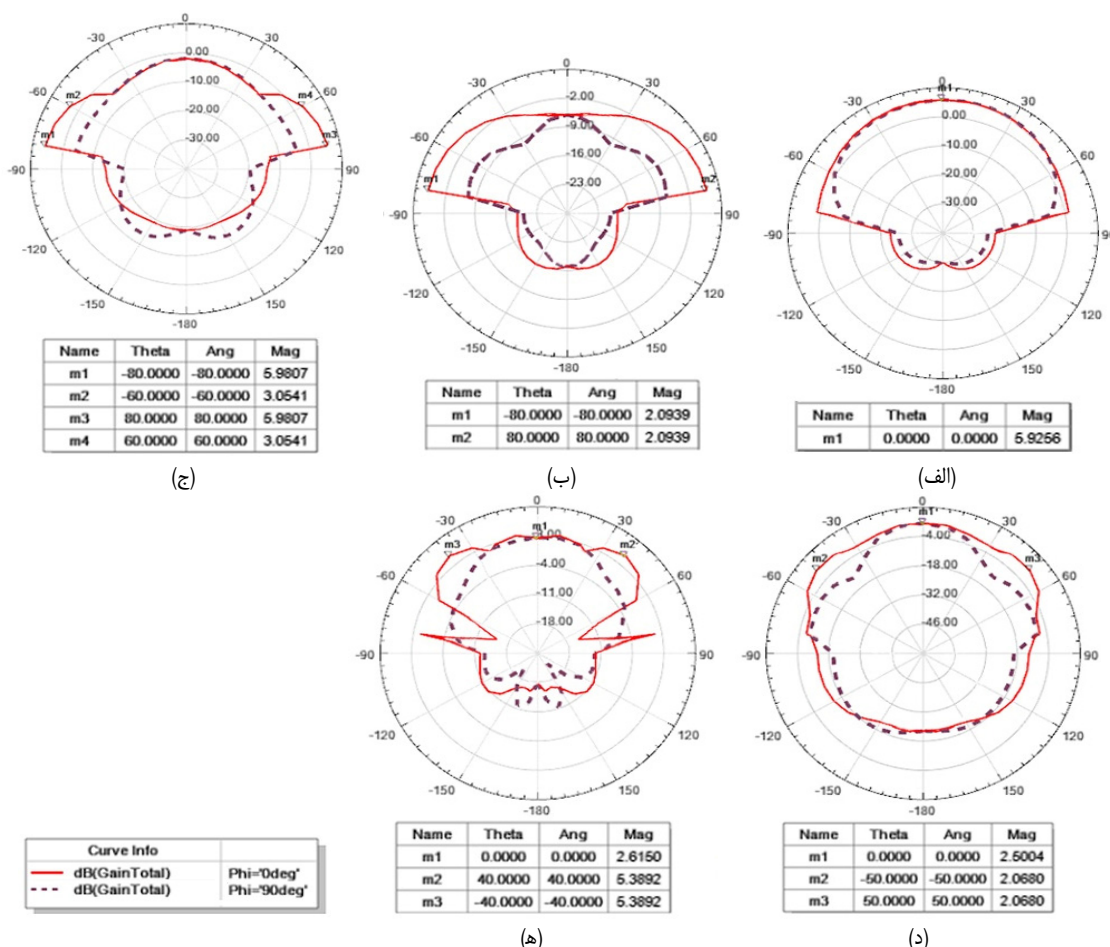
1. Axial Ratio



شکل ۱۴: مقایسه نتایج S_{11} آنتن ساخته شده و شبیه سازی، اندازه گیری - خطچین، شبیه سازی - خط پر.



شکل ۱۵: نتایج شبیه سازی شده نسبت محوری AR در بازه های فرکانس عملکرد آنتن.



شکل ۱۶: پترن تشعشی آنتن و بهره در فرکانس های تشدید، الف) ۱٫۹ GHz (ب) ۴٫۴ GHz (ج) ۵٫۶ GHz (د) ۷٫۸ GHz (ه) ۸٫۵ GHz خط پر $\varphi = 0^\circ$ و خطچین $\varphi = 90^\circ$.

جدول ۱: مقایسه مشخصات آنتن پیشنهادی با آنتن [۱۹].

فعالیت	اندازه (cm)	تعداد فرکانس تشدید	بهره	هزینه (قیمت)	قطبش
آنتن [۱۹]	۷×۷	۳	پایین	بالا	ضعیف
آنتن پیشنهادی	۵٫۴×۴٫۸	۵	بالا	پایین	خوب

- [11] H. Malekpoor and S. Jam, "Enhanced bandwidth of shorted patch antennas using folded-patch techniques," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 198-201, 2013.
- [12] J. S. McLean, "A re-examination of the fundamental limits on the radiation of electrically small antennas," *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 44, no. 5, pp. 672-676, May 1996.
- [13] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, New York, W. H. Freeman and Company, 1982.
- [14] K. Falconer, *Fractal Geometry-Mathematical Foundations and Applications*, New York, John Wiley & Sons, 1990.
- [15] C. Puente-Baliarda, J. Romeu, R. Pous, and A. Cardama, "On the behavior of the sierpinski multiband fractal antenna," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 46, no. 4, pp. 517-524, Apr. 1998.
- [16] O. Hazila, S. A. Aljunid, F. Malek, and A. Sahadah, "Performance comparison between rectangular and circular patch antenna array," in *Proc. IEEE Student Conf. on Research and Development, SCORed'10*, pp. 47-51, Kuala Lumpur, Malaysia, 13-14 Dec. 2010.
- [17] T. Durga Prasad, K. V. Satya Kumar, M. D. Khwaja Muinuddin, C. B. Kanthamma, and V. Santosh Kumar, "Comparisons of circular and rectangular microstrip patch antennas," *International J. of Communication Engineering Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 187-197, Jul. 2012.
- [18] M. H. Zolghadri and S. Jam, "Compact broadband circular polarization antenna for UHF RFID Tags," in *Proc. Int. Conf. on Electrical, computer, Mechanical and Mechatronics, ICE'15*, Istanbul, Turkey, 27-28 Aug. 2015.
- [19] H. Oraizi and S. Hedayati, "Miniaturization of microstrip antennas by the novel application of the Giuseppe Peano fractal geometries," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 8, pp. 3559-3567, Aug. 2012.

شاهرخ جم در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز با گرایش برق و الکترونیک و در سال ۱۳۷۰ مدرک کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی مهندسی برق - مخابرات باگرایش میدان را از دانشگاه علم و صنعت ایران به ترتیب در سال ۱۳۷۰ و ۱۳۸۰ دریافت نمود. از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۳ نامبرده به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه شیراز به کار مشغول بود و پس از راهاندازی دانشگاه صنعتی شیراز از سال ۱۳۸۳ تا کنون در گروه مخابرات آن دانشگاه در مرتبه دانشیار ادامه کار داده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان آنتن، میکروویو، ساختارهای میکرواستریپ و رادار می‌باشد. ایشان هم‌اکنون عضو ارشد (Senior Member IEEE) انجمن مهندسی برق و الکترونیک هستند.

آرش مهبودی در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون در رشته مخابرات و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات را در گرایش میدان از دانشگاه صنعتی شیراز دریافت کرد. نامبرده پس از فارغ‌التحصیلی از سال ۱۳۹۳ تا کنون در زمینه‌ی مخابرات نفت و گاز مشغول به فعالیت است و زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان بررسی و مطالعه پوشش آنتن‌ها در سایت‌های صنعتی می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

آنتن پیشنهادی که در این مقاله ارائه شده است علاوه بر ابعاد کوچک و توانایی تشدید در چندین فرکانس، دارای مزایای دیگری نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به بهره خوب، الگوی تشعشی مطلوب و قطبش دایروی اشاره کرد. این عملکرد خاص در کنار ابعاد کوچک و چند فرکانسی بودن آن و همچنین استفاده از زیرلایه بسیار ارزان، نشان می‌دهد که آنتن طراحی شده از نوع فرکتالی برای تولید و استفاده در صنعت بسیار کاربردی خواهد بود.

مراجع

- [1] R. C. Hansen, "Limitations in antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 69, no. 2, pp. 170-182, May 1981.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis, and Design*, ISBN 978-81-265-2422-8, John Wiley & Sons, Inc., U. K., 2013.
- [۳] ح. سعیدیان و ش. جم، "تطبيق امپدانس پهن باند آنتن میکرواستریپ با تزویج روزنه برای کاربردهای بی‌سیم، بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۶ صص، مشهد، ۲۶-۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۲.
- [4] H. Malekpoor and S. Jam, "Analysis on bandwidth enhancement of compact probe-fed patch antenna with equivalent transmission line model," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 1, pp. 8-1, May 2015.
- [5] H. Malekpoor and S. Jam, "Design of an ultra-wideband microstrip patch antenna suspended by shorting pins," *Wireless Personal Communications (Springer)*, vol. 68, no. 2, pp. 3059-3068, Jan. 2013.
- [6] C. Y. D. Sim, J. T. Yeh, C. W. Lin, B. S. Chen, and H. D. Chen, "A slot antenna with circularly polarized radiation for WLAN applications," in *Proc. IEEE 4th Asia-Pacific Antennas and Propagation Conf., APCAP'15*, pp. 168-169, Kuta, Indonesia, Jun. 2015.
- [7] S. Sharma, V. N. Saxena, K. Goodwill, S. K. Singh, and K. Sharma, "CPW fed rectangular slot antenna with dual H-slot on ground for wideband wireless applications," in *Proc. Int. Conf. Signal Processing and Communication, ICSC'15*, pp. 439-442, Noida, India, Mar. 2015.
- [8] H. Malekpoor and S. Jam, "Ultra-wideband shorted patch antennas FED by folded-patch with multi resonances," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 44, pp. 309-326, 2012.
- [9] H. Malekpoor and S. Jam, "Miniaturized asymmetric E-shaped microstrip patch antenna with folded-patch feed," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 7, no. 2, pp. 85-91, 2013.
- [10] H. Malekpoor, A. Bazrkar, S. Jam, and F. Mohajeri, "Miniaturized trapezoidal patch antenna with folded ramp-shaped feed for ultra-wideband applications," *Wireless Personal Communications*, vol. 69, no. 3, pp. 1935-1947, Mar. 2013.