

Doi: 10.71666/jipet.2025.998685

Research Article

A Monopole Antenna for Ultra-Wide Band Applications with Band Rejection features for Wireless Local Area Network and Evaluating Using Multi Attribute Decision Method

Mahdi Jalali^{1,2}, Assistant Professor, Yashar Zehforoosh², Associate Professor

¹Department of Electrical Engineering- Naghadeh Branch, Islamic Azad University, Naghadeh, Iran

²Microwave and Antenna Research Center- Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran
mahdi.jalali@iau.ac.ir, y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

Abstract

A compact printed monopole antenna for ultra-wide band (UWB) applications with band-notched characteristics is designed in this paper. The radiating element of the proposed antenna is composed of an orthogonal patch fed by a 50-ohm microstrip feedline. It has a very compact size of 20mm×12mm, which can be integrated easily with other RF front-end circuits. Also, this antenna is made in small and compact dimensions in the size of 12×20 mm square, which can be easily integrated with other circuits before and after it. The parameters and functions of this antenna have been analyzed and investigated both through simulations and after construction. It has been demonstrated that the proposed antenna provides an ultra-wide bandwidth from 2.81 GHz to 13.30 GHz, completely covering the range set by the federal communication commission (FCC) for UWB operations (3.1GHz to 10.6GHz) and a frequency band rejection (5.14-6.23 GHz) to eliminate wireless local area network (WLAN) systems interfering. The radiation properties of the proposed antenna are also investigated throughout the paper. Besides that, for a fair comparison with other published articles in this field, the multi-criteria decision making (MCDM) method has been used. It also has advantages such as low profile, low cost, high gain and satisfactory radiation characteristics.

Keywords: Band rejection feature, monopole antenna, multi-criteria decision-making method, ultra-wide band system, wireless local area network.

Received: 1 January 2023

Revised: 3 March 2023

Accepted: 1 May 2023

Corresponding Author: Dr. Mahdi Jalali

Citation: M. Jalali, Y. Zehforoosh, "A monopole antenna for ultra-wide band applications with band rejection features for wireless local area network and evaluating using multi attribute decision method", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 63, pp. 127-140, September 2025 (in Persian).

Doi: 10.71666/jipet.2025.998685

مقاله پژوهشی

آنتن تک‌قطبی جدید برای کاربردهای سیستم فرایه‌ن باند با ویژگی حذف باند فرکانسی شبکه محلی بی‌سیم و ارزیابی با روش تصمیم‌گیری چندگانه

مهدی جلالی^{۱،۲}، یاشار زهفروش^۲، دانشیار

۱- گروه برق- واحد نقده، دانشگاه آزاد اسلامی، نقده، ایران

۲- مرکز تحقیقات میکروویو و آنتن- واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

mahdi.jalali@iau.ac.ir, y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک طرح جدیدی از آنتن تک‌قطبی چاپی برای کاربردهای سیستم فرایه‌ن باند (UWB) با ویژگی حذف باند ارائه می‌شود. عنصر تابشی آنتن پیشنهادی از یک پچ متعامد تشکیل شده که توسط یک خط تغذیه میکرونواری ۵۰ اهم تغذیه می‌شود. همچنین این آنتن در ابعاد کوچک در سایز ۲۰×۱۲ میلی‌متر مربع ساخته شده که می‌تواند به راحتی در دستگاه‌های قابل حمل استفاده شود. پارامترها و عملکردهای این آنتن هم از طریق شبیه‌سازی‌ها و هم بعد از ساخت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. آنتن مطرح شده شامل پهنای باند گسترده‌ای از ۲/۸۱ تا ۱۳/۳۰ گیگاهرتز است که به طور کامل محدوده تعیین شده توسط کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC) برای سیستم UWB از ۳/۱ تا ۱۰/۶ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد. همچنین برای جلوگیری از تداخل سیستم‌های شبکه محلی بی‌سیم (WLAN) باند فرکانسی در محدوده (۵/۱۴ تا ۶/۲۳ گیگاهرتز) را حذف می‌کند. خواص تشعشعی آنتن پیشنهادی نیز در مقاله بررسی شده است. همچنین جهت مقایسه منصفانه با دیگر مقاله‌های ارائه شده در این زمینه از روش تصمیم‌گیری چندگانه (MCDM) استفاده شده است. علاوه بر این آنتن از مزایایی مانند سادگی ساخت، هزینه پایین، بهره بالا و نیز ویژگی‌های تابشی قابل قبول برخوردار است.

کلمات کلیدی: آنتن تک‌قطبی، روش تصمیم‌گیری چندگانه، سیستم فرایه‌ن باند، شبکه محلی بی‌سیم، ویژگی حذف باند.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی جلالی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: آذربایجان غربی- نقده- انتهای بلوار شهدا- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نقده- گروه برق

۱- مقدمه

سیستم فرایهن باند^۱ (UWB) که برای ارائه ارتباط پهنای باند بالا (بزرگتر از یک گیگاهرتز در ثانیه) با برد کوتاه (۱۰ متر یا کمتر) مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۱]. این موضوع فرصت‌ها و چالش‌های زیادی را برای طراحان آنتن ایجاد کرده و محققان در این زمینه توانسته‌اند آنتن‌های مختلفی از جمله آنتن پاپیونی^۲، مخروطی^۳، مارپیچ^۴، فراکتال^۵ و آنتن‌های پرپودیک^۶ را با تطبیق امپدانس قابل قبولی در یک باند فرکانسی بسیار بزرگ را معرفی کنند. آنتن‌های پاپیونی یکی از محبوب‌ترین و ارزان‌ترین آنتن‌های فرایهن باند هستند که معمولاً بر روی زیرلایه ارزان قیمت پیاده‌سازی می‌شوند و می‌توانند کل پهنای باند مورد نظر در سیستم‌های فرایهن باند را پوشش دهند. این آنتن‌ها از یک نوار همسطح برای تغذیه و تطبیق امپدانس استفاده می‌کنند [۲]. در مرجع [۳] ویژگی‌های یک آنتن مناسب برای بهره‌برداری از مزایای ذاتی در سیستم‌های ارتباطی پالسی، به‌ویژه سیستم فرایهن باند بیان شده است. از این نظر، چندین معماری آنتن پهن باند سنتی با تأکید بر دیدگاه حوزه زمان ارزیابی می‌شوند. علاوه بر این، یک آنتن UWB باید در کل باند فرکانسی اختصاص داده شده توسط کمیسیون ارتباطات فدرال^۷ (FCC) کارآمد باشد تا اپراتورها را قادر سازد تا از سیستم‌های مختلف برای بهره‌برداری از مزایای UWB بدون نیاز به استفاده از انواع مختلف آنتن، استفاده کنند. اندازه آنتن محدودیتی بر باند فرکانسی آنتن است. اگر شکل یک آنتن فقط تابعی از زاویه باشد عملکرد آنتن مستقل از فرکانس است، چون در آن صورت آنتن هیچ اندازه مشخصی ندارد که نسبت به آن مشابهت‌پذیر باشد. آنتن مارپیچ یکی از آنتن‌هایی است که این ویژگی را دارد [۴].

یکی از جدیدترین روش‌های چندباند کردن، استفاده از هندسه‌های فرکتال در ساختار آنتن است. فرکتال‌ها هیچ اندازه مشخصی ندارند پس در ساختارشان مقیاس‌های مشابهت‌پذیر زیادی دارند. پس می‌توان انتظار داشت که ساختارهایی که خود متشابه هستند و کپی‌های فراوانی از خود در داخل ساختار با اندازه‌های متفاوت را شامل می‌شوند، ماهیتی مستقل از فرکانس و (یا حداقل چند فرکانسی) می‌توانند داشته باشند. علاوه بر این مزیت اصلی، استفاده از هندسه‌های فرکتالی در طراحی آنتن، باعث کوچک‌تر شدن اندازه آن نسبت به حالت معمولی و برای یک فرکانس مشخص می‌شود. همچنین استفاده از ساختارهای فرکتالی باعث کاهش اثرات تزویجی مزاحم و ایجاد قطبی‌شدگی متقاطع می‌شود [۸-۵].

در ارتباطات کوتاه برد UWB برای دستیابی به یک طراحی قابل قبول و رضایت بخش بایستی پهنای باند، سایز و راندمان تابش بهبود و اصلاح شود. این نوع از آنتن‌ها به دلیل داشتن وزن کم، هزینه پایین و سهولت ساخت در ارتباطات بی‌سیم کاربرد گسترده‌ای دارند. مرجع [۹] یک آنتن تک‌قطبی جدید و فشرده را که دارای خاصیت فیلترینگ در دو باند است را معرفی می‌کند. جهت ایجاد باندهای توقف از روش برش‌های دوگانه در قسمت تشعشعی آنتن استفاده شده است. در این موارد داشتن تزویج متقابل کم نیز باید تحقق یابد. این آنتن با توجه به ابعاد کوچک خود دارای بهره پایدار، خواص تشعشعی مناسب و رفتار حوزه زمانی مناسبی است که یکی از بهترین آنتن‌ها جهت استفاده در سیستم‌های فرایهن باند است.

در میان طرح‌های ارائه شده برای آنتن‌های UWB در مقاله‌های اخیر، آنتن‌های تک قطبی مسطح به دلیل داشتن ویژگی‌های الگوی تشعشعی تقریباً هم جهت به یکی از نامزدهای قابل توجه برای کاربردهای UWB تبدیل شده‌اند [۱۰]. با این حال برخی از این آنتن‌های تک قطبی تنها بخشی از باند مورد نظر را پوشش می‌دهند و برخی دیگر به دلیل ابعاد بزرگ نمی‌توانند به راحتی با سایر مدارهای فرکانس رادیویی^۸ (RF) ادغام شوند [۱۱-۱۵]. همچنین برخی دیگر از سیستم‌های باند باریک مانند سیستم شبکه محلی بی‌سیم^۹ (WLAN) در فرکانس‌های ۵/۱۵ تا ۵/۸۲۵ گیگاهرتز و سیستم وای-مکس^{۱۰} (WiMAX) در فرکانس ۳/۴ تا ۳/۷ گیگاهرتز وجود دارند که برای جلوگیری از تداخل احتمالی بین سیستم UWB و سیستم‌های ذکر شده لازم است طراحی آنتن در باند فرکانسی ۵ تا ۶ گیگاهرتز را حذف نمایند [۱۹-۱۶]. به همین دلیل در چند سال گذشته آنتن‌های مسطح^{۱۱} بر اساس تکنیک‌های مختلفی جهت حذف باند مذکور پیشنهاد شده‌اند [۲۰ و ۲۱]. این تکنیک‌ها شامل استفاده از عناصر پارازیتی [۲۲]، برش‌هایی با اشکال مختلف [۲۳]، اضافه کردن رزوناتورهای امپدانس پله‌ای [۲۴]، اضافه کردن نوارهای T شکل، استفاده از ساختارهای فرامواد باند توقفی مغناطیسی^{۱۲} (EBG) و نیز آوردن عناصر U شکل است.

ساختار زمین ناقص^{۱۳} (DGS) یکی دیگر از روش‌های رایج مورد استفاده برای طراحی فیلترهای فشرده UWB است، زیرا امکان حذف هارمونیک‌های ناخواسته خارج از باند را فراهم می‌کند. روش DGS به گونه‌ای بکار می‌رود که اتصال با میکرواستریپ^{۱۴} یا ساختارهای خط انتقال کوپل شده را برای برآوردن ویژگی‌های باند عبور یا توقف امکان‌پذیر سازد. ساختارهای EBG آرایه‌های متناوبی هستند که از مواد دی‌الکتریک، فلزی و یا ترکیبی از فلز و دی‌الکتریک تشکیل می‌شوند. این ساختارها از انتشار امواج در جهت خاص و فرکانس خاص جلوگیری می‌کنند، لذا می‌توانند در فیلتر کردن به‌کار گرفته شوند. این ساختارها به دلایل متفاوتی در آنتن‌ها به کار گرفته می‌شوند. در مواردی ساختارهای EBG دوبعدی به عنوان زیرلایه آنتن میکرواستریپ برای محدود کردن امواج سطحی تحت عنوان سطوح امپدانس بالا به کار گرفته می‌شوند. سطوح متنوعی همانند سطوح هادی مغناطیسی نیز به منظور کاهش عرض مقطع آنتن‌ها، نوعی دیگر از نحوه به‌کارگیری ساختارهای EBG است. یکی دیگر از کاربردهای ساختارهای EBG کاهش تزویج متقابل بین عناصر آنتنی و جلوگیری از انتشار موج سطحی است. موج سطحی یک پدیده ناخواسته در بسیاری از آنتن‌ها است. هدایت انتشار امواج الکترومغناطیسی در امتداد صفحه زمین، برخلاف تشعشع به فضای آزاد، باعث می‌شود که موج سطحی بهره و کارایی آنتن را کاهش دهد. همچنین پراکندگی موج سطحی، تشعشع ناخواسته را افزایش می‌دهد که منجر به کاهش نسبت سیگنال به نویز در سیستم‌های مخابراتی می‌گردد. اساساً جهت کاهش اثرات متقابل دیواره‌ای از ساختار EBG بین دو آنتن تک‌قطبی و یا به صورت زیرلایه قرار می‌گیرد و با شبیه‌سازی تعداد عناصر مشخص می‌شود [۲۵].

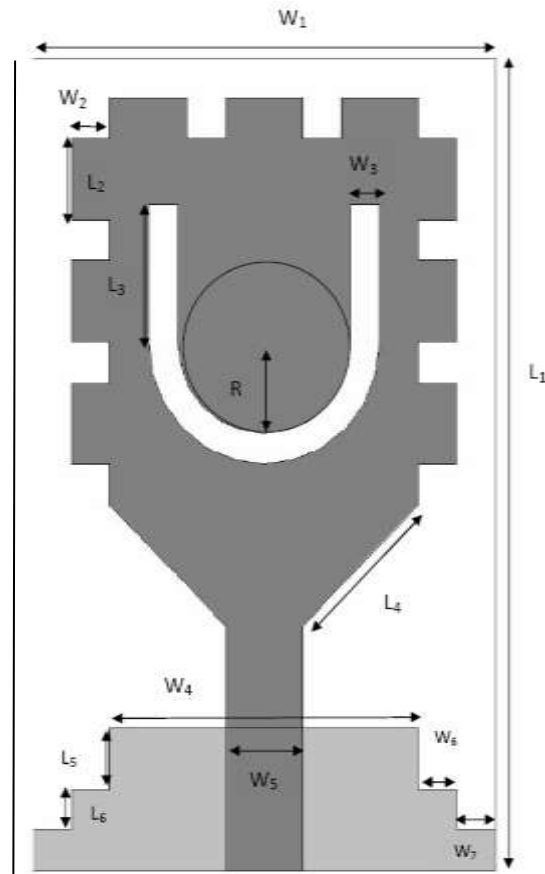
در این مقاله یک آنتن تک‌قطبی^{۱۵} مستطیلی اصلاح شده با میکرونواری مسطح که عملکرد پهنای باند خوبی دارد ارائه می‌شود. طراحی و ساختار آنتن مطرح شده بر اساس آنتن تک‌قطبی مستطیلی شکل ساده است که سطح زمین آن به صورت متقارن کوتاه شده و دارای پهنای باند عملیاتی قابل توجهی است. این آنتن برای کاربرد در فرکانس‌های ۲/۸۱ تا ۱۳/۳ و همچنین حذف باند ۵/۱ تا ۶/۲ گیگاهرتز طراحی شده که برخلاف سایر آنتن‌هایی که تا به امروز در مقاله‌ها گزارش شده این آنتن دارای یک الگوی تابشی هم‌جهت و خوبی را در فرکانس‌های بالا داراست. آنتن تک‌قطبی با استفاده از شبیه‌ساز ساختار فرکانس بالا^{۱۶} (HFSS) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی و ساخت آن برای تأیید ساختار آن برای کاربردهای UWB ارائه شده است. همچنین برای ارزیابی و مقایسه مزیت‌های این ساختار با آنتن‌های ارائه شده در دیگر مقاله‌ها از یک روش تصمیم‌گیری چندگانه^{۱۷} (MCDM) استفاده شده است [۲۶]. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در بخش دوم طراحی آنتن بیان می‌شود. در بخش سوم تحلیل و مطالعه پارامترهای آنتن اشاره شده است. در بخش چهارم ارزیابی و مقایسه آنتن با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندگانه ارائه شده است. در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- طراحی آنتن

شکل (۱) ساختار و ترتیب آنتن تک‌قطبی با پهنای باند بسیار وسیع که از یک سازه مستطیلی شکل تشکیل شده را نشان می‌دهد. این سازه مستطیلی شکل از سه طرف با پچ هم‌اندازه و یکسان پر شده و در بالای آن یک مثلث قرار گرفته که دارای یک شکاف U شکل در وسط آن است. علاوه بر آن همان‌طور که در شکل اشاره شده صفحه زمین^{۱۸} کوتاه‌تر شده است. این آنتن از یک زیرلایه از جنس FR4 با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک ۴/۴ ساخته شده است. آنتن پیشنهاد شده با تغییر دادن یک پارامتر و ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها در یک زمان معین مورد بررسی قرار می‌گیرد. حالت مطلوب و بهینه پارامترهای فیزیکی آنتن در جدول (۱) ارائه شده است. برای درک کامل رفتار ساختار آنتن و همچنین مشخص کردن پارامترهای فیزیکی مطلوب این آنتن در شبیه‌ساز ساختار فرکانس بالا مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در آنتن پیشنهاد شده صفحه زمین کوتاه انتخاب شده و به عنوان یک شبکه تطبیق امپدانس^{۱۹} مؤثر عمل می‌کند که این عامل باعث تحقق یافتن آنتن با پهنای باند امپدانس گسترده می‌شود. همچنین کوتاه شدن صفحه زمین باعث ایجاد بار خازنی شده و حالت القایی را خنثی می‌کند که این عامل سبب به وجود آمدن امپدانس مقاومتی تقریباً خالص در ورودی آنتن می‌شود [۲۷].

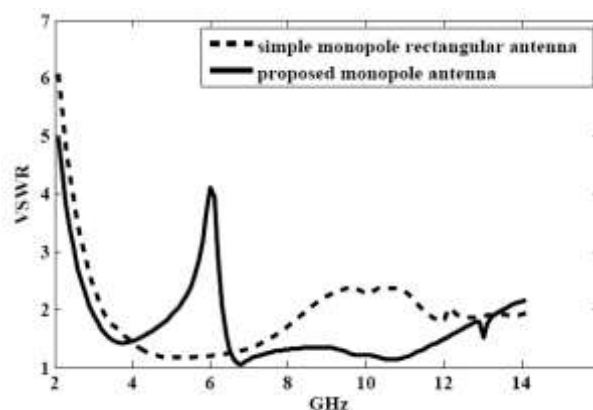
در شکل (۲) مقایسه‌ای از ویژگی‌های نسبت موج ایستاده ولتاژ^{۲۰} (VSWR) آنتن مطرح شده با آنتن تک‌قطبی مستطیلی ساده نشان می‌دهد. از شکل مشاهده می‌شود که آنتن تک‌قطبی ساده دارای پهنای باند نسبتاً باریکی است. همچنین با تعبیه یک

شکاف می توان باند فرکانس سیستم های WLAN را به طور کامل حذف کرد. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود تغییرات متوالی باعث بهبود پهنای باند آنتن تک قطبی مستطیلی می شود. با اعمال تغییرات و اصلاح صفحه زمین می توان تأثیر قابل توجهی در افزایش پهنای باند را مشاهده کرد [۲۸].



شکل (۱): ساختار و ترتیب آنتن تک قطبی پیشنهاد شده

Figure (1): Configuration and arrangement of the proposed monopole antenna



شکل (۲): نمودار نسبت موج ایستاده ولتاژ آنتن پیشنهاد شده و آنتن تک قطبی مستطیلی ساده

Figure (2): VSWR of proposed antenna and simple rectangular monopole antenna

Table (1): Dimensions of the proposed antenna

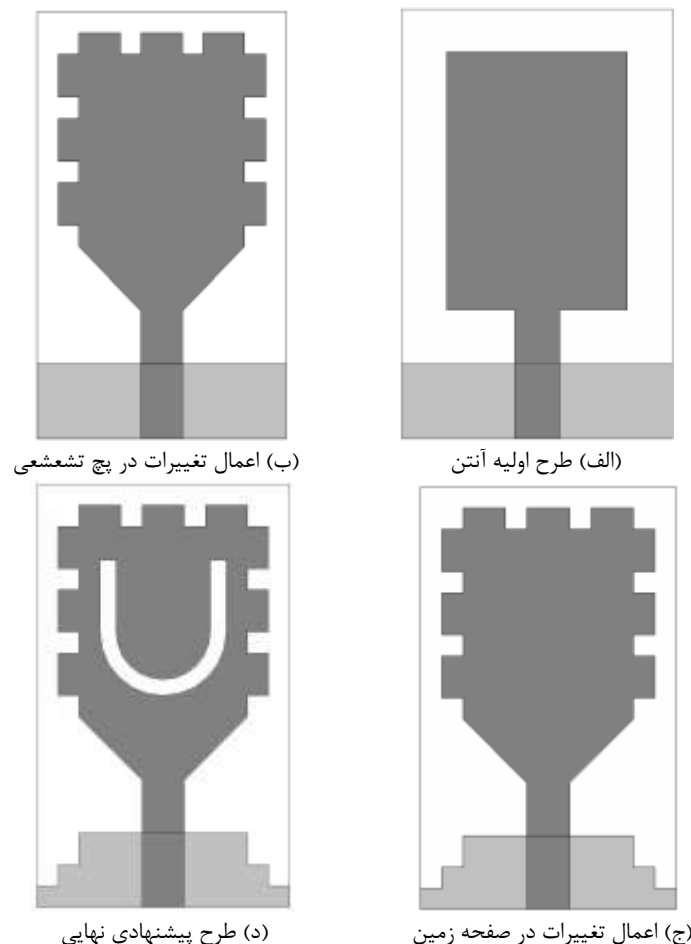
جدول (۱): پارامترهای فیزیکی آنتن پیشنهاد شده

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
۲۰	۲	۳/۴	۴/۲۴	۱/۵	۱	۶
W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7
۱۲	۱	۰/۷۶	۸	۲	۱	۱

۳- تحلیل و مطالعه پارامترهای آنتن

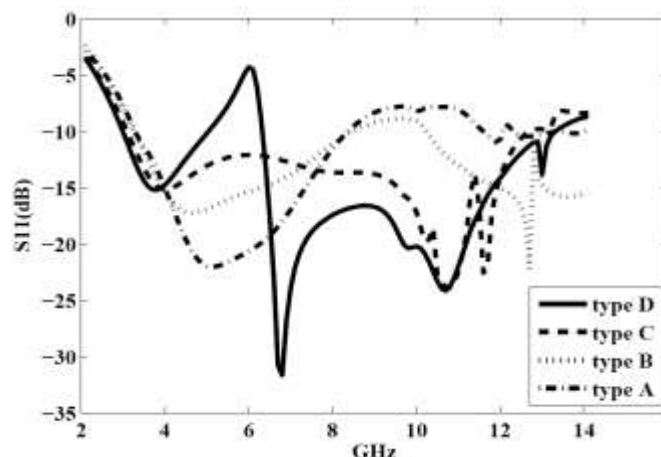
آنتن طراحی شده در این مقاله یک آنتن تکامل یافته از آنتن‌های تک‌قطبی مستطیلی می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. فرآیند تکامل آنتن شامل ایجاد شکاف U شکل در مرکز پچ مثلثی، افزودن تکه‌های باریک مستطیلی شکل در اطراف پچ مستطیلی و همچنین کوتاه کردن صفحه زمین است. تکه‌های باریک مستطیل شکل در اطراف پچ مستطیلی باعث بهبود در بازایی بعضی از مشخصه‌های از دست رفته در فرکانس‌های بالا می‌شود. شکل (۴) مقایسه‌ای از مشخصه و ویژگی‌های تلفات برگشتی در ۴ مرحله از تکامل آنتن را نشان می‌دهد. در شکل (۳-الف) یک نوع آنتن تک‌قطبی مستطیلی ساده‌ای نشان داده شده که دارای پهنای باند نسبتاً باریک و محدود است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود اصلاحات و تغییرات متوالی باعث بهبود در پهنای باند آنتن تک‌قطبی مستطیلی می‌شود. با قرار دادن شکاف‌های هم‌اندازه در پچ تابش و همچنین اصلاح صفحه زمین مانند شکل (۳-ج) تأثیر قابل قبولی در افزایش پهنای باند ایجاد می‌شود.

در ادامه به بررسی اثر طول L_3 (شاخه طولی شکاف U) به روش پارامتریک اشاره می‌شود. شکل (۵) اثرات تغییر اندازه پارامتر L_3 مربوط به شکاف U شکل را بر روی نمودار VSWR نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) پارامتر L_3 را می‌توان به عنوان یک پارامتر مؤثر در تنظیم باند حذفی در نظر گرفت و با انتخاب مقدار مناسب دقت بالا در حذف باند تداخل‌گر را تضمین نمود. با توجه به نمودار و بررسی‌های به‌دست آمده مقدار بهینه برای L_3 برابر $3/4$ میلی‌متر است. شکل (۶) توزیع جریان شبیه‌سازی شده در فرکانس‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. شکل‌های (۶-ج) و (۶-د) توزیع جریان بسیار قوی در اطراف پچ تابش و همچنین جریانی که به سمت پایه‌های کناری هدایت می‌شوند را نشان می‌دهد.



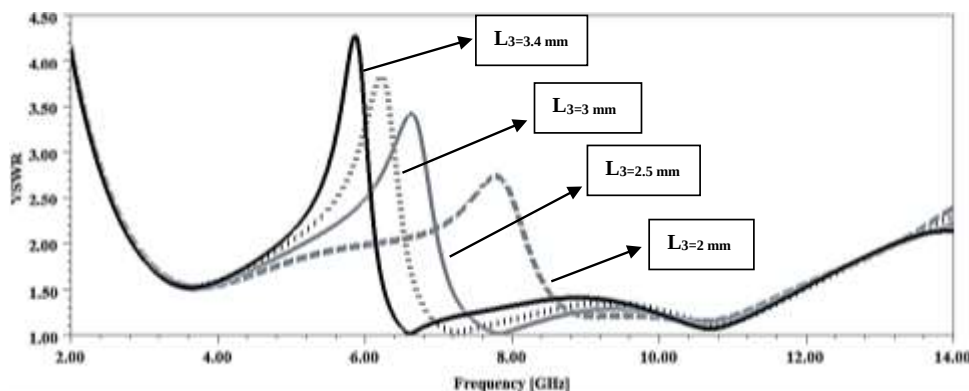
شکل (۳): فرآیند و مراحل تکامل ساختار آنتن از حالت اولیه و اصلی خود تا ساختار پیشنهادی

Figure (3): The process and stages of the evolution of the antenna configuration from its initial and original state to the proposed configuration, a) The initial design of the antenna, b) radiation patch modification, c) Ground plane modification, d) final proposed antenna



شکل (۴): طیف فرکانسی چهار مرحله‌ای تکامل آنتن

Figure (4): Four-stage frequency spectrum(S11) of antenna evolution

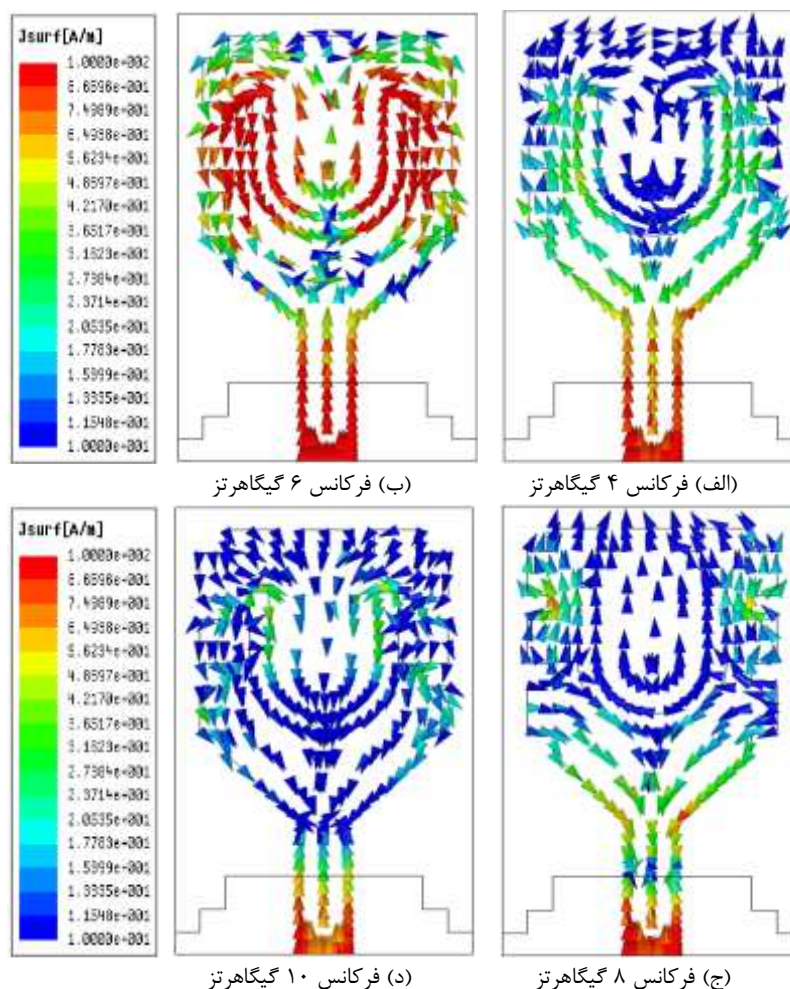


شکل (۵): نمودارهای نسبت موج ایستاده ولتاژ آنتن با اندازه‌های مختلف پارامتر L_3

Figure (5): VSWR of antenna with different sizes of L_3 parameter

لازم به ذکر است که این تغییرات در پیج تابشی حالت‌های تشدید را در فرکانس‌های بالا تحریک می‌کند که تأثیر قابل قبولی در افزایش پهنای باند آنتن دارد. همچنین در شکل (۶-ب) جهت‌های مختلف توزیع جریان در دو طرف شکاف U شکل نشان داده شده است. تصویر آنتن ساخته شده و نیز در حین اندازه‌گیری در شکل (۷) آمده است. آنتن بر روی زیرلایه FR4 با ابعاد $۲۰ \times ۱۲ \times ۱/۶$ میلی‌متر مکعب ساخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنتن که با استفاده از نرم‌افزار HFSS انجام شده و نیز نتایج حاصل از اندازه‌گیری با دستگاه تحلیل‌گر شبکه KEYSIGHT-PNA-X-N5242A صورت گرفته و در شکل (۷) نمایش داده شده است. پارامترهای پراکندگی S شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در شکل (۸) رسم شده‌اند. از شکل (۸) بازه فرکانسی کاری نهایی آنتن ارائه شده را می‌توان دید که دارای ۱۳۰ درصد بازدهی پهنای باند است و باند WLAN نیز از آن به خوبی حذف شده است. مطابقت خوب نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان دهنده دقت و صحت شبیه‌سازی‌ها است.

حداکثر پیک و بهره آنتن (dBi) و همچنین نمودار بازده تشعشعی مربوط به آنتن در شکل‌های (۹) و (۱۰) رسم شده‌اند. دیده می‌شود که تغییرات اندکی در کل باند وجود دارد که نشان از پایداری بهره در باند UWB به غیر از باند فیلتر شده است. علاوه بر این می‌توان دید که در باند WLAN بهره و بازدهی تا حد قابل قبولی کاهش یافته است. یکی از مشخصه‌های تعیین کننده و مهم در آنتن‌ها الگوی تشعشعی است که معمولاً برای کاربرد و عملکرد آنتن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. خصوصیات و ویژگی‌های میدان تابش در آنتن پیشنهاد شده در دو صفحه اصلی (صفحه Y-Z برای سطح E) و صفحه X-Z برای صفحه H) ارائه شده است.



شکل (۶): توزیع جریان‌های شبیه‌سازی شده برای آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های مختلف

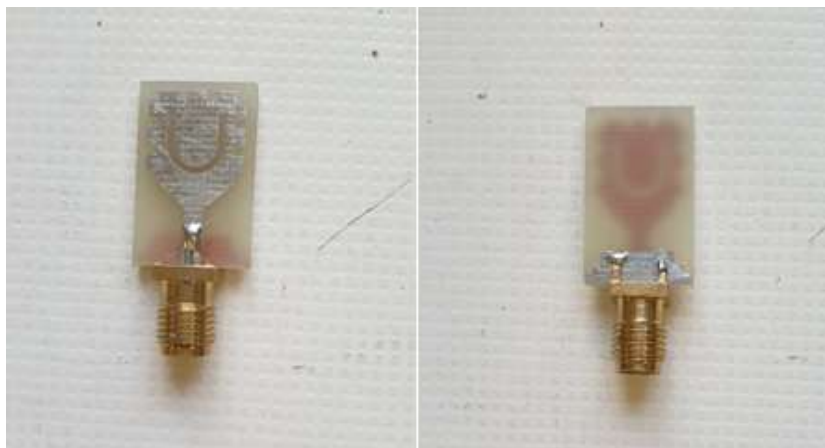
Figure (6): Distribution of simulated currents for the proposed antenna at different frequencies, a) 4 GHz, b) 6 GHz, c) 8 GHz, d) 10 GHz

شکل (۱۱) ثبات و پایداری نمودارها و الگوهای تابش در فرکانس‌های ۳/۱، ۸/۲، ۶/۸ و ۱۰/۶ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار و الگوی صفحه H در فرکانس‌های پایین کاملاً هم‌جهت و در فرکانس‌های بالاتر تقریباً و نزدیک به هم در یک راستا هستند.

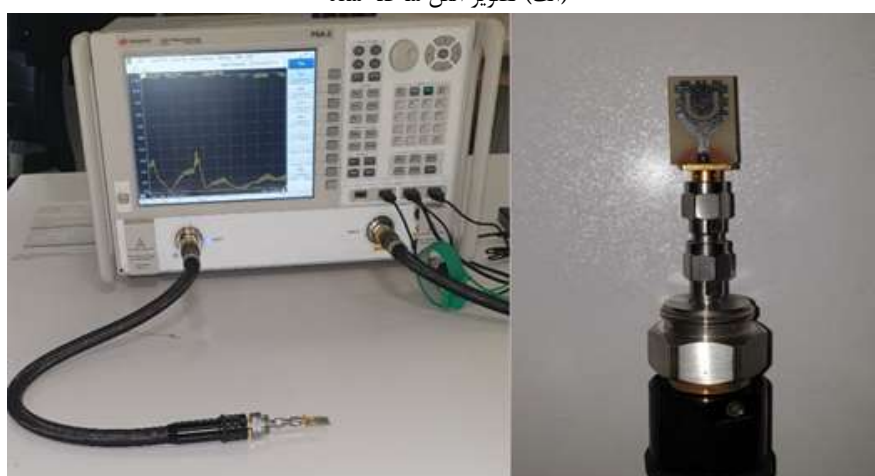
۴- ارزیابی و مقایسه آنتن با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندگانه

با توجه به روش‌های متعدد طراحی آنتن‌های تک‌قطبی و نیز راه حل‌های گوناگون افزایش پهنای باند، همچنین ساختارهای حذف و فیلترینگ باندهای فرکانسی که در سال‌های اخیر در مقالات مختلف ارائه شده است، مقایسه و اولویت دادن این روش‌ها و مکانیسم‌ها بر یکدیگر ضروری است.

جهت مشخص کردن نوآوری‌های موجود در مقاله‌ها معمولاً از جدول‌های مقایسه و نیز بحث‌های طولانی استفاده می‌شود که در بسیاری از این موارد برتری آنتن ارائه شده به دلیل نزدیکی مشخصه‌های آنتن‌ها به یکدیگر به درستی مشخص نمی‌کند. دلیل این امر مقایسه و بررسی بر اساس تنها یکی از ویژگی‌های آنتن‌ها مانند اندازه، پهنای باند فرکانسی و یا بهره است. زیرا در این حالت ممکن است آنتن مورد نظر در تمامی این مشخصه‌ها بر دیگر آنتن‌های مورد مقایسه ارجحیت نداشته باشد و در نتیجه نتوان برتری کامل را برای آنتن مورد بررسی را در نظر گرفت. در این حالت استفاده از روش تصمیم‌گیری چندگانه بهترین روش می‌تواند باشد که بهترین گزینه را بر اساس چندین معیار از بین گزینه‌های مختلف انتخاب می‌کند. انتخاب معیارها بخش اول این روش است.



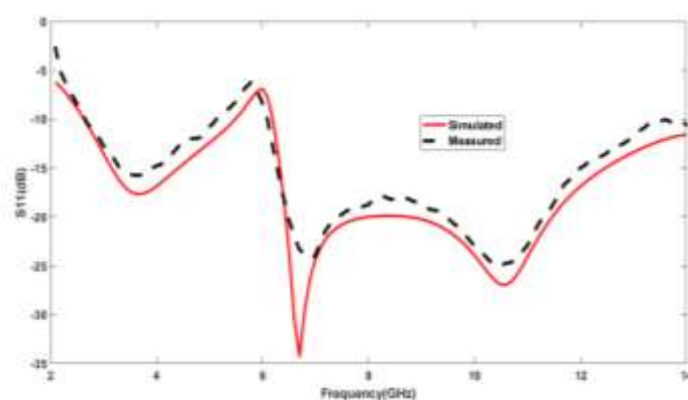
(الف) تصویر آنتن ساخته شده



(ب) آنتن در حال اندازه گیری

شکل (۷): نمای آنتن ساخته شده

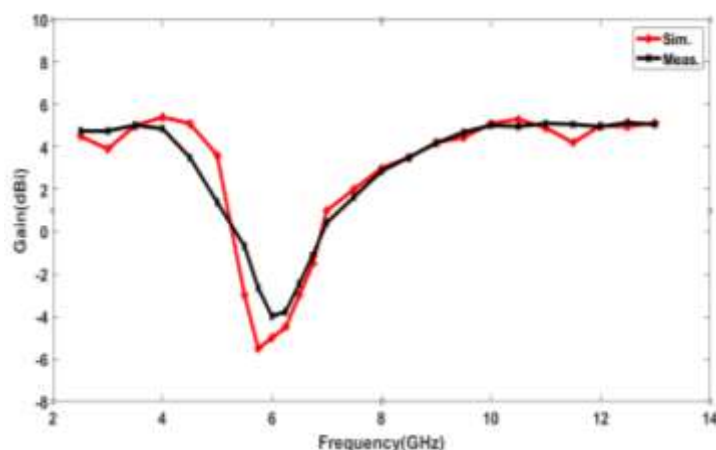
Figure (7): Built antenna view, a) Fabricated proposed antenna photograph, b) antenna being measured



شکل (۸): دامنه ضریب برگشتی شبیه سازی و اندازه گیری شده برای آنتن پیشنهادی

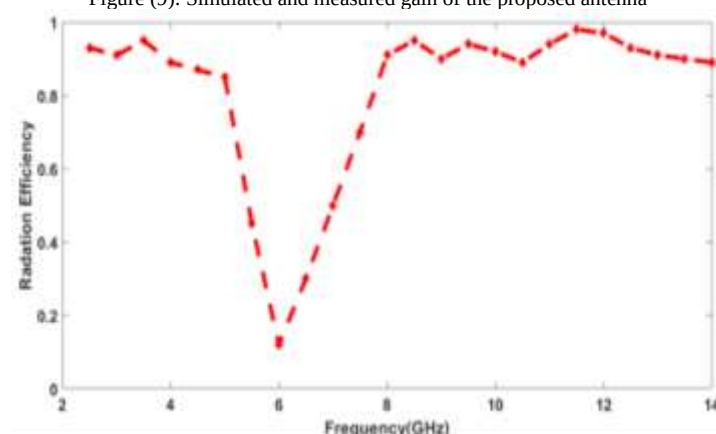
Figure (8): Simulated and measured S11 parameter of the proposed antenna

در مرحله دوم کاندیدها بر اساس معیارهای انتخاب شده ارزیابی می شوند. در نهایت با جمع آوری داده ها در ارتباط با تمامی معیارها و به تفکیک هر یک از گزینه ها، مقایسه زوجی گزینه های مختلف صورت می گیرد. بررسی نتایج و تعیین اولویت هر یک از کاندیدها یکی از مهم ترین کاربردهای تصمیم گیری چندمعیاره با استفاده از این فرآیند است. در این مقاله آنتن تک قطبی معرفی شده در شکل (۱) را با آنتن های ارائه در مرجع های [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۲۹] و [۳۰] با استفاده از روش تصمیم گیری چندگانه مقایسه می شود.



شکل (۹): نمودار بهره شبیه سازی و اندازه گیری شده آنتن پیشنهادی

Figure (9): Simulated and measured gain of the proposed antenna



شکل (۱۰): نمودار بازده تشعشعی آنتن پیشنهادی

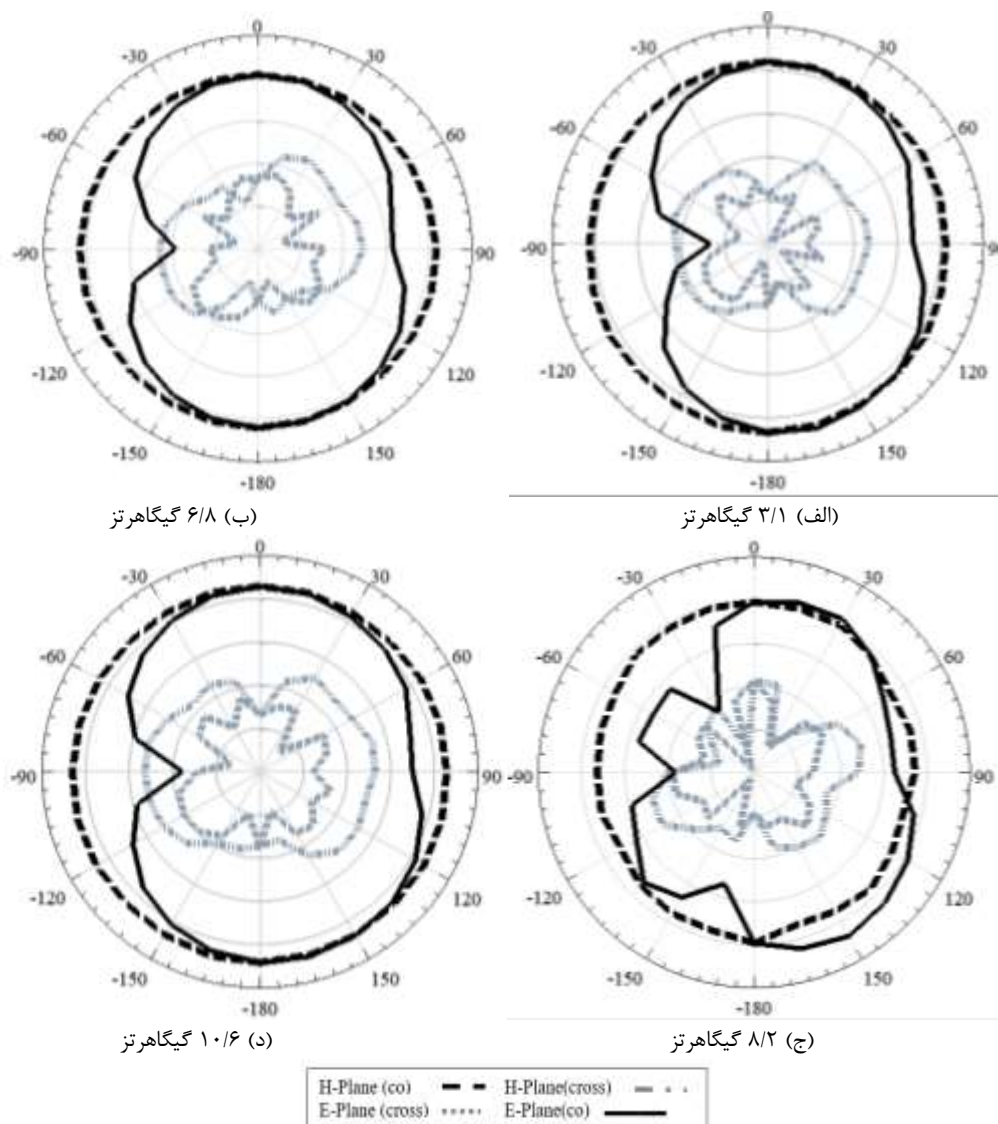
Figure (10): Radiation efficiency of the proposed antenna

شکل (۱۲) نمایی از روش را برای انتخاب بهترین آنتن تک قطبی مسطح ارائه می‌دهد که شامل سه طبقه کاندیدها^{۲۱}، ویژگی‌ها^{۲۲} و نهایتاً هدف که در اینجا یافتن بهترین ساختار آنتنی است. جهت انجام یک مقایسه درست و منصفانه کلیه گزینه‌ها آنتن‌هایی هستند که روی زیر لایه FR4 پیاده‌سازی شده و در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند. معیارهای مقایسه که در شکل (۱۲) دیده می‌شوند شامل ابعاد آنتن، پهنای باند فرکانسی، تغییرات حداکثر بهره در باند فرکانسی است. مشخصه‌های آنتن‌های مورد مقایسه در جدول (۲) آمده است. در جدول (۲) مشاهده می‌شود که هیچ‌یک از آنتن‌های مورد مقایسه برتری کامل از لحاظ معیارهای مشخص شده بر یکدیگر را دارا نیستند.

برای به‌کارگیری این روش ابتدا یک تابع خطی چند متغیره به‌صورت رابطه (۱) تشکیل داده می‌شود که شامل وزن‌ها W_{Size} ، $W_{Bandwidth}$ و $W_{peak\ gain}$ و مقادیر نرمالیزه $U_{Bandwidth}$ ، U_{Size} و $U_{peak\ gain}$ برای هریک از مشخصه‌های آنتن‌ها است. مقادیر طوری نرمالیزه می‌شوند که آنتن با بهترین و بالاترین مقدار مطلوب در مشخصه موردنظر بیشترین ارزش را دریافت نماید.

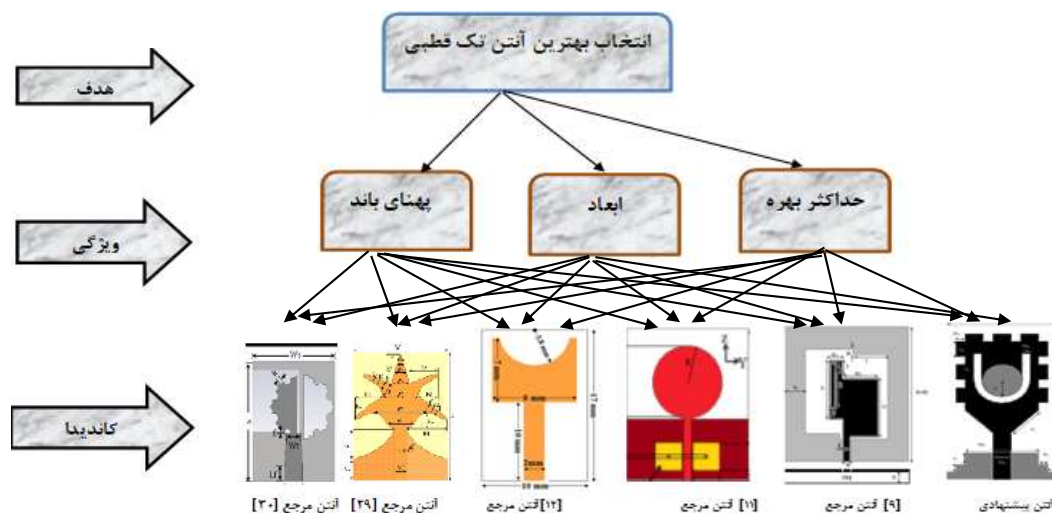
$$U_{Antenna(i)} = W_{peak\ Gain} \cdot U_{peak-Gain (Antenna(i))} + W_{Bandwidth} \cdot U_{Bandwidth (Antenna (i))} + W_{Size} \cdot U_{Size (Antenna (i))} \quad (1)$$

جدول (۳)، چهار حالت مختلف را برای وزن‌های مربوط به هر یک از معیارهای مقایسه را نشان می‌دهد. برای سهولت و دقت در استفاده از این روش، نرم‌افزار اکسپرت چوی^{۲۳} نیز استفاده می‌شود.



شکل (۱۱): مدل و الگوی تابش آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های مختلف

Figure (11): The radiation pattern of the proposed antenna at different frequencies, a) 3.1 GHz, b) 6.8 GHz, c) 2.8 GHz, d) 10.6 GHz



شکل (۱۲): شمایک روش تصمیم‌گیری چندگانه برای انتخاب بهترین آنتن تک قطبی

Figure (12): Schematic of multiple decision-making method to choose the best monopole antenna

Table (2): Characteristics of the compared antennas

جدول (۲): مشخصه‌های آنتن‌های مورد مقایسه

ماکزیمم بهره (دسیبل)	عرض باند (درصد)	تکنیک حذف باند	میانگین بازدهی تشعشعی	پهنای باند (گیگا هرتز)	فرکانس مرکزی (گیگا هرتز)	ابعاد بر حسب طول موج	اندازه (میلی‌متر مربع)	مرجع
۵/۴	۱۳۰	برش U شکل	۹۵ درصد	۱۳/۳۰ - ۲/۸۱	۸/۰۵۸۸	$۰/۳۲۴\lambda_0 \times ۰/۵۴\lambda_0$	۱۲×۲۰	آنتن پیشنهادی
۵	۱۴۲	ساختار فرامواد باند توقفی مغناطیسی	*	۲-۱۲	۶/۷۵	$۰/۹۵۴\lambda_0 \times ۱/۱۳\lambda_0$	۴۲×۵۰	[۱۱]
۵/۴	۸۲	**	*	۲/۷۸ - ۶/۶۲	۴/۷	$۰/۷۰۵\lambda_0 \times ۰/۷۰۵\lambda_0$	۴۵×۴۵	[۱۲]
۶	۱۰۰	برش با تنظیم بین دیود	*	۱۳/۵۴ - ۸/۷۵	۱۱/۱۴	$۰/۳۳\lambda_0 \times ۰/۱۹\lambda_0$	۱۷×۱۰	[۱۳]
۳/۹	۱۲۸	**	*	۱۴/۳۸ - ۳/۰۸	۸/۷۳	$۰/۳۹\lambda_0 \times ۰/۴۳\lambda_0$	۱۳/۵×۱۴/۸	[۲۹]
۳/۶	۱۲۶	**	*	۳/۳ - ۱۳/۵	۵/۱	$۰/۲۷۵\lambda_0 \times ۰/۲۲۴\lambda_0$	۱۶×۱۳	[۳۰]

* اطلاعاتی در مورد میانگین بازدهی تشعشعی در مرجع مورد نظر وجود ندارد.

** حذف باند در مرجع صورت نگرفته است.

Table (3): Weight assignments for the different attributes in different states

جدول (۳): حالت‌های مختلف برای وزن‌های مربوط به معیارهای مقایسه

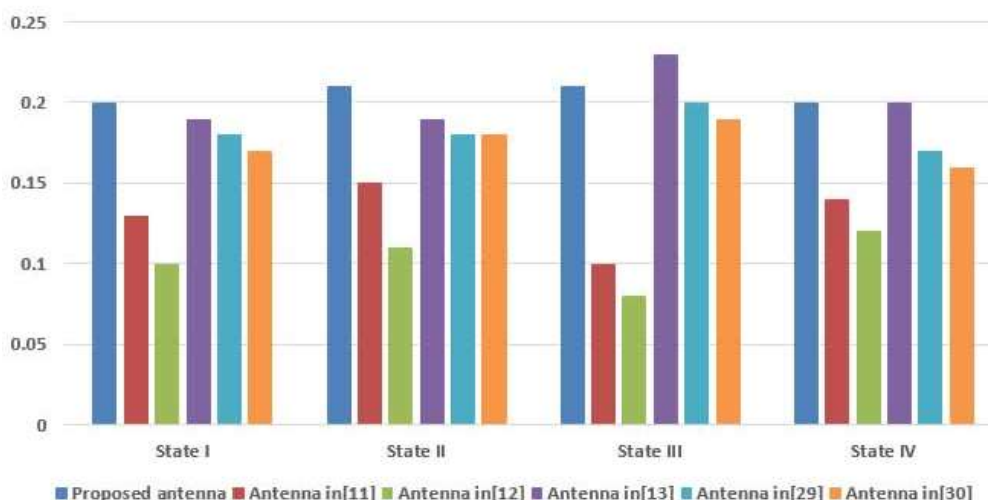
حالت چهارم	حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	معیار مقایسه
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵	۰/۳۳	وزن پهنای باند
۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۳۳	وزن ابعاد آنتن
۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۳	وزن ماکزیمم بهره

Table (4): Utility values for the investigated antennas in different states

جدول (۴): مقادیر به‌دست آمده از رابطه (۱) برای هریک از آنتن‌ها در حالت‌های مختلف

حالت چهارم	حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	نوع آنتن
۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۰	آنتن پیشنهادی
۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۳	[۱۱]
۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۰	[۱۲]
۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۱۸	[۱۳]
۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۸	[۲۹]
۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۷	[۳۰]

برای مثال در حالت اول مطابق جدول (۳) دیده می‌شود که تمامی معیارها اهمیت یکسانی دارند، ولی در حالت دوم وزن مربوط به پهنای باند دو برابر بقیه وزن‌ها است که مشخص کننده حالتی است که اهمیت پهنای باند پوشش داده شده توسط آنتن بیشتر است و یا در حالت سوم اهمیت دارا بودن ابعاد کوچک دو برابر بیشتر از بقیه مشخصه‌های آنتن در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۳): نمودار میله‌ای برای مقادیر جدول (۳) برای حالات مختلف

Figure (13): Utility values for the investigated antennas in four states

در جدول (۴) مقادیر بعد از جاگذاری وزن‌ها در رابطه (۱) لیست شده‌اند. همچنین شکل (۱۳) نمودار میله‌ای برای مقادیر جدول (۴) را نشان می‌دهد که مقایسه آنتن‌ها را در حالت‌های مختلف آسان‌تر می‌نماید. از نمودارهای شکل (۱۳) معلوم است که آنتن معرفی شده در این مقاله در تمامی حالت‌ها به غیر از حالت ۳ وضعیت بهتری را نسبت به دیگر آنتن‌ها دارد که این نشان دهنده مؤثر بودن روش‌های استفاده شده در طراحی آنتن شکل (۱) جهت رسیدن به یک ساختار مطلوب برای استفاده در سیستم UWB است. همچنین با توجه به شکل (۱۳) امکان رتبه‌بندی همه آنتن‌های مورد مقایسه فراهم شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن تک‌قطبی مسطح و فشرده طراحی و ساخته شده است که عملکرد و پهنای باند وسیعی را به نمایش درمی‌آورد. نتایج نشان می‌دهد که با جاگذاری پایه‌های مربعی روی پیچ تابشی و ایجاد قطعه مثلثی شکل در بخش اتصال خط تغذیه و پیچ تابش و همچنین استفاده از صفحه زمین کوتاه شده پهنای باند آنتن به صورت قابل قبولی بهبود می‌یابد. علاوه بر این می‌توان با تعبیه یک شکاف U شکل به حذف باند فرکانس WLAN دست یافت. آنتن پیشنهاد شده پهنای باند امپدانس $130/22$ درصد را در محدوده فرکانس $2/81$ تا $13/30$ گیگاهرتز با تلفات برگشتی بهتر از 10 -دسی‌بل و حذف باند $5/14$ تا $6/23$ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. همچنین ساختار پیشنهادی با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری چندگانه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از نرم‌افزار اکسپرت چوی نشانگر برتری آنتن معرفی شده از لحاظ ابعاد، پهنای باند فرکانسی، توانایی حذف باند فرکانسی تداخل‌گر و نیز تغییرات کم بهره در باند فرکانسی پوشش داده شده بر آنتن‌های ارائه شده در دیگر مقاله‌ها است. در ضمن نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل و خصوصیات تابشی در محدوده فرکانس UWB به‌صورت قابل قبول و رضایت بخشی هستند.

References

مراجع

- [1] P.S. Sharma, S. Vijay, M. Shukla, "Ultra-wideband technology: standards, characteristics, applications", *Helix*, vol. 10, no. 04, pp. 59-65, Aug. 2020 (doi: 10.29042/2020-10-4-59-65).
- [2] K.Y. Yazdandoost, R. Kohno, "Bow-tie antenna for UWB communication frequency", *Proceeding of the IEEE/APS*, vol. 3, pp. 2520-2523, Monterey, CA, USA, June 2004 (doi: 10.1109/APS.2004.1331886).
- [3] S. Licul, J.A.N. Noronha, W.A. Davis, D.G. Sweeney, C.R. Anderson, T.M. Bielawa, "A parametric study of time-domain characteristics of possible UWB antenna architectures", *Proceeding of the IEEE/VETECF*, vol. 5, pp. 3110- 3114, Orlando, FL, USA, Oct. 2003. (doi: 10.1109/VETECF.2003.1286196)

- [4] J. Anguera, A. Andújar, J. Jayasinghe, V.V.S.S.S. Chakravarthy, P.S.R. Chowdary, J.L. Pijoan, T. Ali, C. Cattani, "Fractal antennas: an historical perspective", *Fractal and Fractional* vol. 4, no. 1: 3, Jan. 2020 (doi: 10.3390/fractalfract4010003).
- [5] F. Ghaedi, J. Jamali, M. Taghizadeh, "Dual-polarized MED antenna by using metallic plates for mobile communication applications", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 52, pp. 121-131, March 2023 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.52.9.4)
- [6] K. Srivastava, A. Kumar, A. K. Verma, Q. Zhang, B.K. Kanaujia, S. Dwari, "Integrated GSM and UWB fractal monopole antenna with triple notches", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 10, pp. 2364–2366, July 2016 (doi: 10.1002/mop.30049).
- [7] D.H. Werner, S. Ganguly, "An overview of fractal antenna engineering research", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 1, pp. 38-57, Feb. 2003 (doi: 10.1109/MAP.2003.1189650).
- [8] K.M.P. Aghdam, R. Faraji-Dana, J. Rashed-Mohassel, "Compact dual-polarisation planar log-periodic antennas with integrated feed circuit", *IEE Proceeding- Microwaves, Antennas and Propagation Journal*, vol. 152, No. 5, pp. 359-366, Nov. 2005 (doi: 10.1049/ip-map:20050091).
- [9] M. Naser-Moghadasi, R.A. Sadeghzadeh, R.K. MohammadLou, M. Jalali, B.S. Virdee, "Miniature planer monopole antenna with dual-band rejection characteristics for UWB applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, pp. 1977-1981. 2013 (doi.org/10.1002/mop.27771).
- [10] J. Liang, C. Choo, X. Chen, C. Clive, G. Parini, "Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, Nov. 2005 (doi: 10.1109/TAP.2005.858598).
- [11] N. Jaglan, S.D. Gupta, B.K. Kanaujia, S. Srivastava, "Band notched UWB circular monopole antenna with inductance enhanced modified mushroom EBG structures", *Wireless Networks*, vol. 24, pp. 383–393 Aug. 2016 (doi: 10.1007/s11276-016-1343-7).
- [12] E. Shirazi, M.A. Honarvar, "Design and simulation of a novel broadband circularly polarized microstrip slot antenna", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 26, pp. 45-52, July 2016 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1395.7.26.5.6).
- [13] K. Srivastava, G. Varshney, R. Singh, "Compact ultra-wideband monopole antenna with tunable notch bandwidth/frequency ratio", *Frequenz*, vol. 75, no. 7-8, pp. 289-300, July 2021 (doi: 10.1515/freq-2020-0173).
- [14] C.C. Lin, Y.C. Kan, L.C. Kuo, H.R. Chuang, "A planar triangular monopole antenna for UWB communication", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 624–626, Oct. 2005 (doi: 10.1109/LMWC.2005.856694).
- [15] C.C. Lin, H.R. Chuang, Y.C. Kan, "A 3–12 GHz UWB planar triangular monopole antenna with ridged ground-plane", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 83, pp. 307–321, July 2008 (doi: 10.2528/PIE-R08070502).
- [16] H.J. Zhou, B.H. Sun, Q.Zh. Liu, J.Y. Deng, "Implementation and investigation of U-shaped aperture UWB antenna with dual band-notched characteristics", *Electronics Letters*, vol. 44, no. 24, pp. 1387-1388, Nov. 2008 (doi: 10.1049/el:20082661).
- [17] R. Gayathri, T.U. Jisney, D.D. Krishna, M. Gopikrishna, C.K. Aanandan, "Band-notched inverted-cone monopole antenna for compact UWB systems", *Electronics Letters*, vol. 44, no. 20, pp. 1170-1171, Sept. 2008 (doi: 10.1049/el:20081770).
- [18] N. Malekpour, M. A. Honarvar, A. Dadgarpour, "Design and simulation of a compact UWB MIMO antenna with mutual coupling reduction", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 25, pp. 15-20, April 2016 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1395.7.25.2.1).
- [19] D. Li, Sh. Quan, Zh. Wang, "A printed ultra-wideband hexagon monopole antenna with WLAN band-notched designs for wireless communication", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 4, pp. 1049-1052, April 2009 (doi: 10.1002/mop.24265).
- [20] Z. Badamchi, Y. Zehforoosh, "Switchable single/dual band filtering UWB antenna using parasitic element and T-shaped stub wave cancellers", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no.12, pp. 2946-2950, Dec. 2015 (doi: 10.1002/mop.29477).
- [21] N. Ojaroudi A. Musavand, Y. Zehforoosh, H. Ojaroudi, "A compact UWB slot antenna with reconfigurable band-notched function for multimode applications", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 14-18, Aug. 2021.
- [22] P.P. Shome, T. Khan, S.K. Koul, Y.M.M. Antar, "Two decades of UWB filter technology: advances and emerging challenges in the design of UWB bandpass filters", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 22, no. 8, pp. 32-51, Aug. 2021 (doi: 10.1109/MMM.2021.3078040).
- [23] P. Dalal S.K. Dhull, "Upper WLAN band notched UWB monopole antenna using compact two via slot electromagnetic band gap structure", *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 100, pp. 161-171, March 2020 (doi:10.2528/PIERC20012101).

- [24] V.K.R Devana, V. Satyanarayana, A.V. Lakshmi, Y. Sukanya, C.M. Kumar, V.P. Ponnappalli, K. Jagadeesh Babu, "A novel compact fractal UWB antenna with dual band notched characteristics", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 110, pp. 349–360. Feb. 2022 (doi: 10.1007/s10470-021-01958-0).
- [25] P.R. Babu, D. Ramakrishna, G. Ensermu, "Triple band-notch UWB antenna embedded with slot and EBG structures", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2023, Article Paper: 3461751, April 2023 (doi: 10.1155/2023/3461751).
- [26] Y. Zehforoosh, M. Sefidi, A. Shadmand, "Design of a novel planar monopole antenna for UWB applications with dual band notch characteristic and evaluating using analytical hierarchy process", *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, vol. 48, no. 83, pp. 53-60, May 2018.
- [27] P. Beigi, Y. Zehforoosh, M. Rezvani, J. Nourinia, "Evaluation of a compact triangular crinkle-shaped multiband antenna with circular polarized for ITU band based on MADM method", *Circuit world*, vol. 45, no. 4, pp. 292-299, Oct. 2019 (doi: 10.1108/CW-04-2019-0040).
- [28] T. Saeidi, I. Ismail, A.R.H. Alhawari, W.P. Wen, "Near-field and far-field investigation of miniaturized UWB antenna for imaging of wood", *AIP Advances*, vol. 9, no. 3, March 2019 (doi: 10.1063/1.5081762).
- [29] M.M. Fakharian, P. Rezaei, "Very compact palmate leaf-shaped CPW-FED monopole antenna for UWB applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, pp. 1612-1616, July 2014 (doi: 10.1002/mop.28395).
- [30] A.S. Abd El-Hameed, D.A. Salem, E.A. Abdallah E.A. Hashish, "Fractal quasi-self complimentary miniaturized UWB antenna", *Proceeding of the IEEE/APSURSI*, pp. 15-16, Orlando, FL, USA, July 2013 (doi: 10.1109/APS.2013.6710668).

زیر نویس‌ها

1. Ultra-wide band
2. Bow tie
3. Conical
4. Spiral
5. Fractal
6. Periodic
7. Federal communications commission
8. Radio frequency
9. Wireless local area network
10. Worldwide interoperability for microwave access
11. Planer
12. Electromagnetic band gap
13. Defected ground structure
14. Microstrip
15. Monopole
16. High frequency structure simulator
17. Multiple-criteria decision-making
18. Ground plane
19. Impedance matching network
20. Voltage standing wave ratio
21. Alternatives
22. Attributes
23. Expert choice (<http://expertchoice.com/academic-program/for-students>)