

آنتن پوشیدنی تک قطبی فشرده برای کاربردهای شبکه های بی سیم تن پوش

فرزاد مهاجری*^۱، مریم دارابی^۲

۱. استاد، بخش مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۲. کارشناس ارشد، بخش مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

چکیده

در این مقاله یک آنتن پوشیدنی تک قطبی مسطح فشرده ارائه شده است. آنتن پیشنهادی براساس آنتن مایکرواستریپ ساده با پیچ مستطیلی طراحی شده است. ابعاد کلی این آنتن تنها $16 \times 24 \times 0.5$ میلی متر مکعب یا $0.13 \lambda_0 \times 0.196 \lambda_0 \times 0.004 \lambda_0$ بوده که در آن λ_0 طول موج عملکردی در فضای آزاد و در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز است. همچنین در این طراحی از تکنیک صفحه زمین ناقص و نیز صفحه زمین معیوب استفاده شده است. ابعاد آنتن پیشنهادی نسبت به آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم بیش از ۸۴٪ کاهش یافته و دارای پهنای باند نسبی ۶.۲٪ بوده و میزان بهره آنتن در فرکانس مرکزی ۲.۴۵ گیگاهرتز ۱.۰۸ dBi و میزان راندمان کل آن بیش از ۷۳٪ است. همچنین عملکرد آنتن پیشنهادی بر روی نمونه فانتوم بافت قفسه سینه مورد بررسی قرار گرفته و عملکردی کاملاً قابل قبول را به دست داده است. در نهایت میزان آهنگ جذب ویژه نیز برای آنتن پیشنهادی محاسبه شده که نشان می دهد این آنتن عملکردی ایمن را به دست می دهد. **واژه های کلیدی:** آنتن پوشیدنی، آنتن تک قطبی، کاربردهای پزشکی، صفحه زمین معیوب، آهنگ جذب ویژه، شبکه های بی سیم تن پوش.

Compact Monopole Wearable Antenna for Wireless Body Area Network Applications

Farzad Mohajeri*¹, Maryam Darabi²

1. Professor, Faculty of Electronics and Communication, Shiraz University, Shiraz, Iran.
2. Master of Communication, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract

In this paper, a compact planar monopole wearable antenna is presented. The proposed antenna is designed based on the conventional rectangular microstrip antenna. The overall size of the antenna is only $16 \times 24 \times 0.5$ mm³ or $0.13 \lambda_0 \times 0.196 \lambda_0 \times 0.004 \lambda_0$ where λ_0 is the wavelength in free-space concerning 2.4 GHz frequency. Furthermore, in this design, a partial ground plane and defected ground structure techniques are also used to improve the antenna's overall performance. More than 84% size reduction based on the conventional rectangular microstrip antenna is achieved for the proposed design. The proposed antenna has a fractional band width of 6.2%, a gain of 1.08 dBi, and, total efficiency at 2.45 GHz is more than 73%. Furthermore, the antenna's performance over a phantom model of chest tissue is examined as well, and the antenna showed an acceptable performance. Finally, the proposed antenna's scientific absorption rate (SAR) value is determined and the result is declared a safe performance.

Key words: Wearable antenna, Monopole antenna, Medical applications, Defected ground structure, Scientific absorption rate, Wireless body area network.

در دو دهه اخیر، با توسعه بیشتر در تکنولوژی‌های شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش^۱ (WBAN) توجه محققان بیش از پیش به حوزه دستگاه‌های پوشیدنی معطوف شده است [۱]. به ویژه کاربردهای پزشکی این حوزه جهت تشخیص، درمان و پایش بیماران مورد توجه مهندسان و محققان قرار گرفته است که از این جمله می‌توان به کپسول‌های آندوسکوپی [۲] و ضبط داده‌های شبکه عصبی [۳] اشاره نمود. همچنان که با وجود پاندومی کرونا، اهمیت استفاده از WBAN و تحقیقات بیشتر در این زمینه پر رنگ‌تر از همیشه حس می‌شود. یکی از کلیدی‌ترین عناصر در چنین شبکه‌هایی آنتن‌های پوشیدنی هستند چرا که وظیفه دریافت و انتقال داده‌ها را بر عهده دارند. اما طراحی آنتن‌های پوشیدنی الزامات فراوانی دارد که گاهی تحقق همه آنها ممکن نیست. از جمله مهم‌ترین این الزامات کوچک بودن و کم‌حجم بودن آنتن پوشیدنی است [۴] تا به راحتی بتواند با دستگاه‌های مختلف WBAN همراه شده و یا در صورت قرارگیری بر روی بدن کاربران کمترین جای ممکن را اشغال کند. به علاوه از آنجا که این آنتن‌ها در نزدیکی بدن قرار می‌گیرند، باید عملکرد آن‌ها در نزدیکی چنین محیط تلف داری مورد بررسی قرار گیرد. همچنین فاکتور ایمنی آنتن براساس کمیت آهنگ جذب ویژه^۲ (SAR) باید مطابق با استانداردهای تعیین شده توسط کمیسیون‌های بین‌المللی، یعنی استانداردهای FCC^۳ و ICNIRP^۴ باشد [۵ و ۶]. در همین راستا پژوهش‌های فراوانی در حوزه آنتن‌های پوشیدنی خصوصاً در حوزه پزشکی صورت گرفته است [۷ و ۸]. به عنوان نمونه در [۹]، یک آنتن پوشیدنی کاملاً منسوج و برپایه الیاف پلیمر با پهنای باند فوق وسیع جهت کاربردهای پزشکی و به طور خاص تصویربرداری مایکروویو ارائه شده است.

در بسیاری از پژوهش‌ها، آنتن‌های پوشیدنی که ارائه شده اند ابعاد بزرگ یا حجیمی دارند [۱۰ و ۱۱]. در [۱۲] یک آنتن پوشیدنی پهن باند جهت کاربردهای پوشیدنی ارائه شده است. در این طراحی از دو پیچ و نیز دو زیرلایه دی‌الکتریک جهت دستیابی به پهنای باند بالا استفاده شده و علی‌رغم عملکرد خوب ساختار، ابعاد کلی آن $۱۷ \times ۶.۱۷ \times ۱۸۲.۵ \times ۱۰۹.۵$ میلی مترمکعب است که بسیار حجیم و بزرگ است. در برخی از پژوهش‌های سال‌های اخیر طراحی آنتن‌های قابل تنظیم در حوزه کاربردهای پوشیدنی مورد توجه قرار گرفته است. این گونه آنتن‌ها می‌توانند خصوصاً در ارتباطات WBAN عملکردی با قابلیت اطمینان بالا به دست دهند، گرچه گاهی استفاده مکرر از پهنای اتصال کوتاه در طراحی‌های این چنینی می‌تواند بر پیچیدگی ساختار بیفزاید و نیز پوشیدنی بودن آن را تحت الشعاع قرار دهد [۱۳ و ۱۴]. در [۱۵] یک آنتن پوشیدنی بر پایه آنتن مایکرواستریپ با ابعاد و حجم مناسبی طراحی و پیشنهاد شده است. در این طراحی از پهنای اتصال کوتاه استفاده شده است که علاوه بر پیچیده‌تر شدن طراحی و ساخت، افزایش هزینه‌ها و نیز نقض فاکتور راحتی برای کاربر را به

دنبال دارد. در برخی طراحی‌های اخیر استفاده از روش فراکتال کردن^۵ پیچ جهت کوچک‌سازی آنتن پوشیدنی استفاده شده است [۱۶]. البته استفاده از این روش بر پیچیدگی ساختار می‌افزاید چراکه بعضاً تکنیک‌های ساخت خاص و نتیجتاً هزینه بالاتری را می‌طلبد. در [۱۷ و ۱۸]، از تکنیک ساختار زمین معیوب^۶ (DGS) جهت کوچک‌سازی آنتن پوشیدنی و نیز دستیابی به عملکرد بهتر به ویژه از لحاظ پهنای باند استفاده شده است. در [۱۸] علاوه بر DGS از تکنیک فراکتال کردن پیچ نیز با یک هندسه خاص استفاده شده که تا حد زیادی هندسه آنتن را پیچیده نموده است. در یک دهه اخیر استفاده از ساختارهای باند ممنوعه الکترومغناطیسی^۷ (EBG) در آنتن‌های پوشیدنی توجه مهندسان را بیش از پیش به خود جلب نموده است [۱۹-۲۵]. در طراحی‌های پوشیدنی مبتنی بر ساختارهای EBG، نشان داده شده که علاوه بر بهبود کلی عملکرد آنتن، میزان تشعشعات عقبی به سمت بدن تا حد بسیار زیادی کنترل شده و لذا عملکردی ایمن حاصل می‌شود.

در این مقاله، یک آنتن پوشیدنی با ابعاد کاملاً کوچک و کم حجم جهت کاربردهای پزشکی در حوزه WBAN طراحی و ارائه شده است. آنتن پیشنهادی برپایه زیرلایه راجرز RO4003 (ثابت دی‌الکتریک ۳.۵۵ و تانژانت تلفی ۰.۰۰۲۷) با ضخامت ۰.۵ میلی متر طراحی شده است. دلیل این انتخاب صرفاً در دسترس بودن و نیز قیمت ارزان آن بوده است. در این طراحی از یک طرح DGS مستطیلی شکل استفاده شده تا یک تطبیق امپدانس مناسب در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز حاصل شود. به علاوه وجود DGS، ضریب کیفیت آنتن را کاهش داده و لذا سبب افزایش پهنای باند آن شده است. به این ترتیب ابعاد کلی آنتن پیشنهادی تنها $۰.۵ \times ۱۶ \times ۲۴$ میلی مترمکعب یا $۰.۰۰۴ \lambda_0 \times ۰.۱۹۶ \lambda_0 \times ۰.۱۳ \lambda_0$ بوده که در آن λ_0 طول موج فضای آزاد در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز است. همچنین عملکرد کلی آنتن پیشنهادی در فضای آزاد و نیز بر روی یک مدل فانتوم از بافت قفسه سینه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در نهایت نشان داده شده است که آنتن پیشنهادی در فاصله مناسب از بدن میزان SAR کوچکی داشته و عملکرد ایمنی را به دست می‌دهد و به این ترتیب با ابعاد کوچک و کم حجم خود و نیز عملکرد مناسب می‌تواند نامزدی مناسب برای کاربردهای حوزه WBAN باشد.

۲- طراحی آنتن

در ابتدا یک آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم مطابق با شکل ۱-الف جهت عملکرد در باند پزشکی ۲.۴ گیگاهرتز برپایه زیرلایه راجرز RO4003 با ضخامت ۰.۵ میلی متر طراحی شده است. گرچه زیرلایه راجرز RO4003 به واسطه صلب بودن چندان مناسب کاربردهای پوشیدنی نیست اما به دلیل در دسترس بودن و نیز قیمت مناسب در این طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد کلی این آنتن پس از

⁵ Fractalization

⁶ Defected Ground Structure

⁷ Electromagnetic Band-Gap Structures

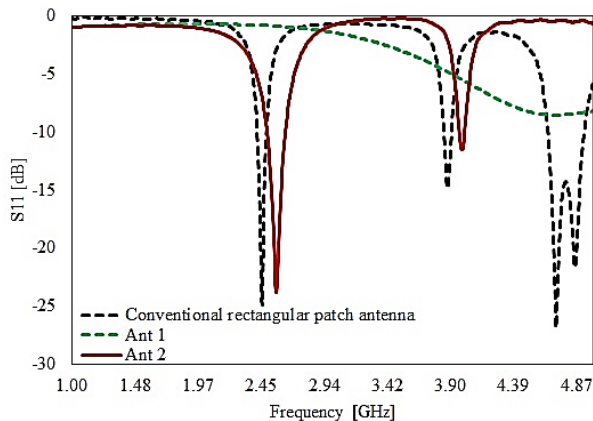
¹Wireless Body Area Networks

²Scientific Absorption Rate

³ Federal Communications Commission

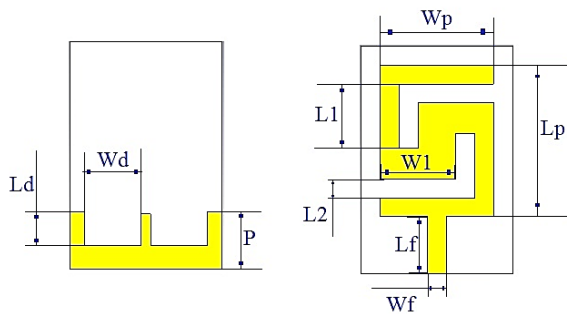
⁴ International Commission on Non-Ionizing Radiation protection

یک رزونانس حاصل شده، اما برای آنتن ۱، فرکانس رزونانس در حوالی ۴.۵ گیگاهرتز به دست آمده و برای آنتن ۲ با شکاف‌های L شکل، یک فرکانس رزونانس در فرکانس ۲.۵۷ گیگاهرتز حاصل شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای آنتن با شکاف‌های L شکل، پهنای باند نسبی بیشتری نسبت به آنتن مایکرواستریپ پایه به دست آمده است.



شکل ۲- نمودار اندازه S_{11} برای مراحل مختلف طراحی

برای داشتن عملکرد در فرکانس مد نظر ۲.۴۵ گیگاهرتز از دو شکاف مستطیلی کوچک در صفحه زمین آنتن استفاده شده است. استفاده از این DGS مستطیلی شکل سبب می‌شود یک اثر اندوکتانسی و خازنی مضاعف به مدار معادل آنتن اضافه شده و به این ترتیب رزونانس به سمت فرکانس‌های پایین‌تر انتقال داده شود. هندسه نهایی آنتن پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین جهت تغذیه آنتن پیشنهادی از یک خط مایکرواستریپ ۵۰ اهمی استفاده می‌گردد. ابعاد و اندازه‌های آنتن پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است.

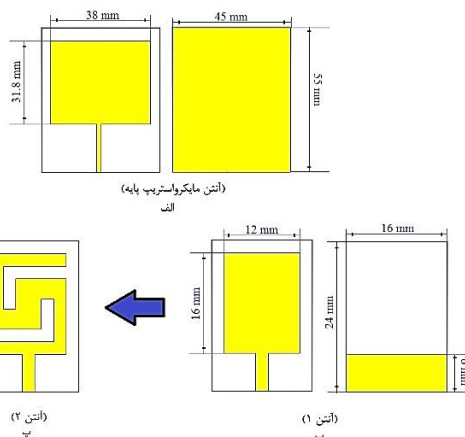


شکل ۳- هندسه کلی آنتن پوشیدنی پیشنهادی

جدول ۱- ابعاد آنتن پوشیدنی پیشنهادی

پارامتر	اندازه [mm]	پارامتر	اندازه [mm]
Wp	۱۲	P	۶
Lp	۱۶	Wd	۶
L1	۶.۸	Ld	۳.۵
W1	۸	Wf	۲
L2	۲	Lf	۶

محاسبه براساس فرمولاسیون‌های ارائه شده در [۲۶ و ۲۷] و بهینه‌سازی در نرم‌افزار CST، $۰.۵ \times ۵۵ \times ۴۵$ میلی مترمکعب به دست آمده است. چون این ابعاد برای یک آنتن پوشیدنی در کاربردهای WBAN بزرگ است پس جهت کوچک‌سازی آنتن در گام نخست ابعاد کلی به ۱۵.۵٪ ابعاد آنتن اولیه کاهش یافته و سپس از تکنیک صفحه زمین ناقص^۱ استفاده شده است، که در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود. به این ترتیب ابعاد نهایی آنتن تنها $۰.۵ \times ۲۴ \times ۱۶$ میلی مترمکعب است. همانگونه که در [۲۸] توضیح داده شده است، ایجاد شکاف در پیچ روشی ارزان قیمت و کاملاً ساده جهت کوچک‌سازی آنتن است. در حقیقت با ایجاد شکاف‌هایی در پیچ، مسیر جریان و در نتیجه طول الکتریکی آنتن افزایش یافته و لذا عملکرد در فرکانس مورد نظر حاصل می‌شود. همانطور که در شکل ۱-پ مشاهده می‌شود، در این طراحی از دو شکاف L شکل که به صورت آینه‌وار در مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند استفاده شده است. وجود این شکاف‌ها، اثرات اندوکتانسی و خازنی مضاعفی را به مدار معادل آنتن اضافه نموده و لذا فرکانس رزونانس آنتن به سمت فرکانس‌های پایین‌تر انتقال داده می‌شود.

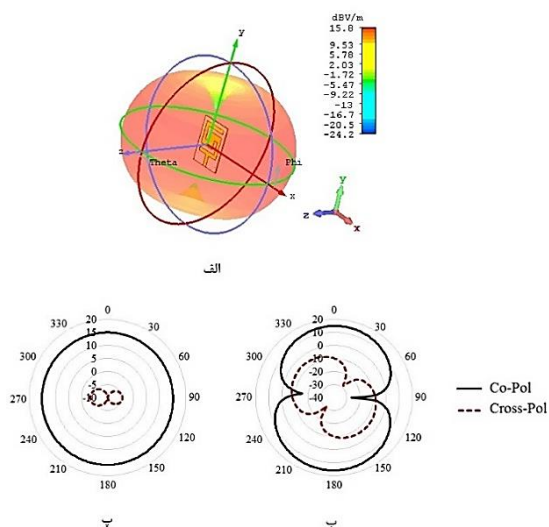


شکل ۱- هندسه ساختار (الف) آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم، (ب) آنتن مایکرواستریپ با صفحه زمین ناقص، (پ) آنتن با شکاف‌های L شکل

نمودار اندازه S_{11} برای آنتن مایکرواستریپ پایه و مراحل طراحی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم، در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز یک رزونانس حاصل شده، اما برای آنتن ۱، فرکانس رزونانس در حوالی ۴.۵ گیگاهرتز به دست آمده و برای آنتن ۲ با شکاف‌های L شکل، یک فرکانس رزونانس در فرکانس ۲.۵۷ گیگاهرتز حاصل شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای آنتن با شکاف‌های L شکل، پهنای باند نسبی بیشتری نسبت به آنتن مایکرواستریپ پایه به دست آمده است. نمودار اندازه S_{11} برای آنتن مایکرواستریپ پایه و مراحل طراحی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم، در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز

^۱ Partial Ground Structure

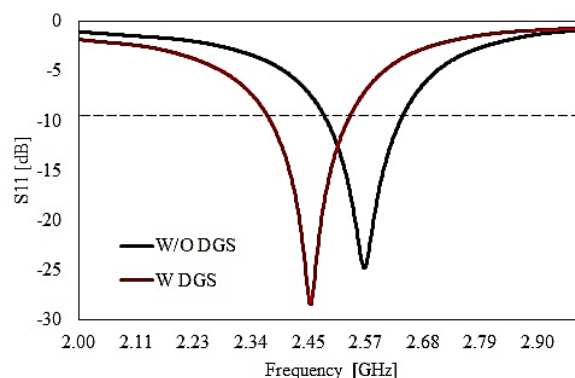
فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز و برای دو صفحه E و H به ترتیب در شکل‌های ۵-ب و ۵-پ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در صفحه E، بیشینه تشعشعات در راستای مثبت و منفی محور Z قرار دارد و در صفحه H، یک الگوی تشعشعی همه‌جهته حاصل شده است. به علاوه، سطح پلاریزاسیون‌های هم راستا ۲ و غیر هم راستا ۳ نیز در این شکل مشخص است. همانگونه که به وضوح مشاهده می‌شود یک ایزولاسیون در حدود ۲۵ دسی‌بل در هر دو صفحه E و H مابین سطوح پلاریزاسیون‌های هم راستا و غیر هم راستا حاصل شده است. این مسئله نشان می‌دهد که به واسطه ابعاد و حجم بسیار کوچک آنتن و نیز وجود DGS، تحریک و تشعشعات ناشی از امواج سطحی بسیار ناچیز بوده است.



شکل ۵ - (الف) الگوی تشعشعی سه بُعدی آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز. الگوی تشعشعی دو بُعدی آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز در صفحه (ب) E، (پ) H

ملاحظه می‌گردد که میزان راندمان کل برای آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، ۷۳/۸۲٪ به دست آمده که با توجه به ابعاد کوچک این آنتن، بسیار مناسب است. به علاوه مطابق با شکل ۶-الف، در باند فرکانسی عملکرد آنتن، میزان راندمان کل در سرتاسر باند فرکانسی تقریباً ثابت بوده، که نشان از عملکرد با ثبات آنتن پیشنهادی دارد. میزان بیشینه راندمان کل در باند فرکانسی عملکرد بیش از ۷۵٪ به دست آمده است. بهره بیشینه برای آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز ۱۰.۸۸dBi حاصل شده است. منحنی بهره بیشینه بر حسب فرکانس در شکل ۶-ب دیده می‌شود. همانطور که پیداست بهره در سرتاسر باند فرکانسی عملکرد، مقداری ثابت دارد. بیشینه بهره در باند فرکانسی عملکرد بیش از ۱۵.۷۷dBi به دست آمده است. به این ترتیب ماهیت آنتن در این

به این ترتیب با وجود شکاف‌های L شکل، تکنیک‌های صفحه زمین ناقص و نیز صفحه زمین معیوب، ابعاد کلی آنتن تا بیش از ۸۴٪ نسبت به آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم کاهش یافته، و لذا ابعاد جدید آنتن تنها ۱۶×۲۴×۰.۵ میلی مترمکعب یا $0.13\lambda_0 \times 0.196\lambda_0 \times 0.004\lambda_0$ بوده که در آن λ_0 طول موج در فضای آزاد در فرکانس عملکردی آنتن است. این مزیت در حالی به دست آمده که هندسه کلی آنتن پیشنهادی عاری از هرگونه پیچیدگی است. با توجه به ابعاد کوچک و حجم بسیار کوچک آن، آنتن پیشنهادی نامزدی مناسب برای شبکه‌های بی‌سیم تن پوش و ارتباطات پوشیدنی خواهد بود. شکل ۴ نمودار اندازه S_{11} آنتن پیشنهادی با و بدون DGS ترسیم شده است. همانطور که از این نمودار مشخص است با وجود DGS، عملکرد آنتن در باند پزشکی ۲.۴ گیگاهرتز که مختص فعالیت‌های پزشکی علمی-صنعتی^۱ (ISM) است حاصل می‌شود. به علاوه به دلیل وجود DGS، ضریب کیفیت آنتن کاهش یافته و به این ترتیب پهنای باند آنتن نسبت به حالت بدون DGS تا ۶.۵٪ افزایش یافته است. به این ترتیب آنتن طراحی شده محدوده فرکانسی ۲.۳۷۸ تا ۲.۵۳ گیگاهرتز را در برمی‌گیرد که باند پزشکی ۲.۴ گیگاهرتز ISM (۲.۴ تا ۲.۴۸۵۳ گیگاهرتز) را به خوبی پوشش می‌دهد.



شکل ۶ - نمودار اندازه S_{11} آنتن پیشنهادی با و بدون DGS

۲-۱- عملکرد آنتن پوشیدنی در فضای آزاد

با توجه به استفاده از تکنیک‌های صفحه زمین ناقص و نیز صفحه زمین معیوب، آنتن پیشنهادی یک الگوی تشعشعی همه‌جهته را به دست داده است. الگوی تشعشعی سه بُعدی آنتن در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود. این الگوی تشعشعی در سرتاسر باند فرکانسی عملکرد، حفظ شده است و لذا آنتن پیشنهادی می‌تواند به خوبی در دستگاه‌ها و سنسورهای WBAN با قابلیت اطمینان بالا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین الگوی تشعشعی دوبعدی آنتن پیشنهادی در

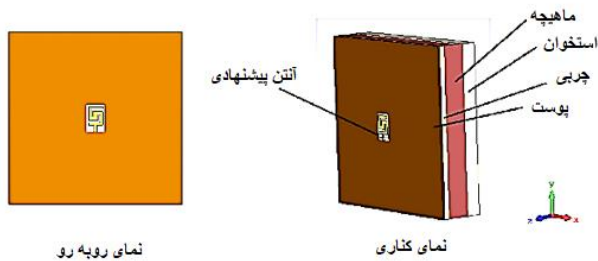
³ Cross-Polarization

¹ Industrial Scientific Medical

² Co-Polarization

جدول ۲ - مشخصه‌های الکتریکی لایه‌های مختلف مدل بافت قفسه سینه در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز [۲۹]

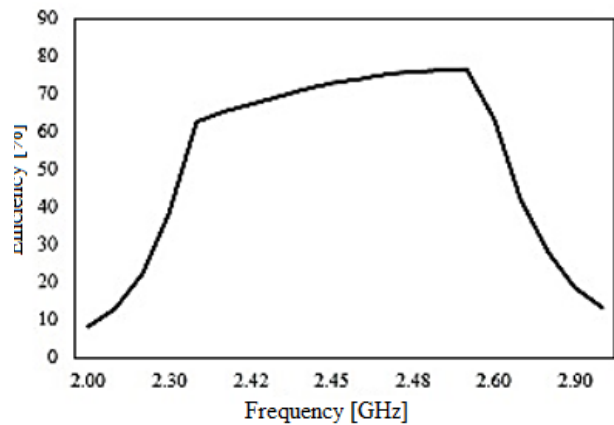
پوست	چربی	ماهیچه	استخوان	
۲۷/۹۵	۵/۲۷	۵۲/۶۷	۱۸/۴۹	ثابت دی الکتریک (ϵ_r)
۱/۴۹	۰/۱۱	۱/۷۷	۰/۸۲	رسانندگی (σ) [$\frac{S}{m}$]
۱۰۰۱	۹۰۰	۱۰۰۶	۱۰۰۸	چگالی [$\frac{kg}{m^3}$]
۲	۵	۲۰	۱۳	ضخامت [mm]



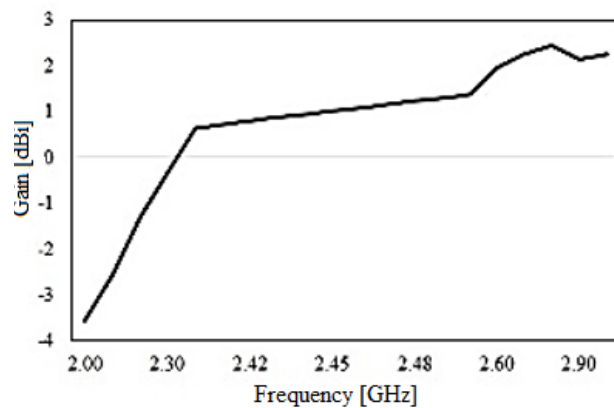
شکل ۷ - قرارگیری آنتن پیشنهادی بر روی مدل بافت قفسه سینه

با توجه به اینکه بدن انسان در فرکانس‌های بالا همانند یک محیط تلف دار برای امواج الکترومغناطیسی عمل می‌کند، پس در هنگام قرارگیری آنتن در نزدیکی آن، تمامی پارامترهای عملکردی آن همچون فرکانس رزونانس، پهنای باند، تطبیق، الگوی تشعشعی و غیره به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. از آنجا که آنتن پیشنهادی دارای یک الگوی تشعشعی همه‌جهته است پس استفاده از آن در فواصل بسیار نزدیک به بدن می‌تواند خطر آفرین باشد، ولی چون آنتن پیشنهادی جهت استفاده در دستگاه‌ها و سنسورهای WBAN طراحی شده است، لذا الگوی تشعشعی همه‌جهته قابلیت اطمینان آن را افزایش می‌دهد. در شکل ۸ نمودار اندازه S_{11} آنتن در حالت قرارگیری بر روی نمونه مدل فانتوم بافت قفسه سینه با نمودار حاصله از فضای آزاد مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در فواصل بسیار نزدیک به بافت (۲ میلی متر) آنتن به شدت تحت تأثیر محیط تلف دار بدن قرار گرفته است و اصطلاحاً آنتن از فرکانس تنظیم خود خارج شده است. گرچه در فاصله ۴ میلی متری از مدل بافت، فرکانس رزونانس اندکی تغییر مکان داده که این امر به علت طبیعت تلف دار و با ثابت دی‌الکتریک بالای بدن انسان است. همچنین در این فاصله عملکرد با ثبات و مشابه با نتیجه حاصله از فضای آزاد به دست آمده است. با افزایش فاصله مشاهده می‌شود که رزونانس آنتن به فرکانس‌های بالاتر تغییر مکان داده است. در شکل ۹ الگوی تشعشعی دو بُعدی آنتن پیشنهادی در دو صفحه E و H، برای فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز در دو حالت قرارگیری در فواصل مختلف از مدل قفسه سینه و فضای آزاد مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در هنگام قرارگیری آنتن بر روی مدل

باند فرکانسی کاملاً مناسب و با ثبات بوده و با توجه به ابعاد کوچک آن می‌تواند در دستگاه‌ها و سنسورهای WBAN به کار گرفته شود.



الف



ب

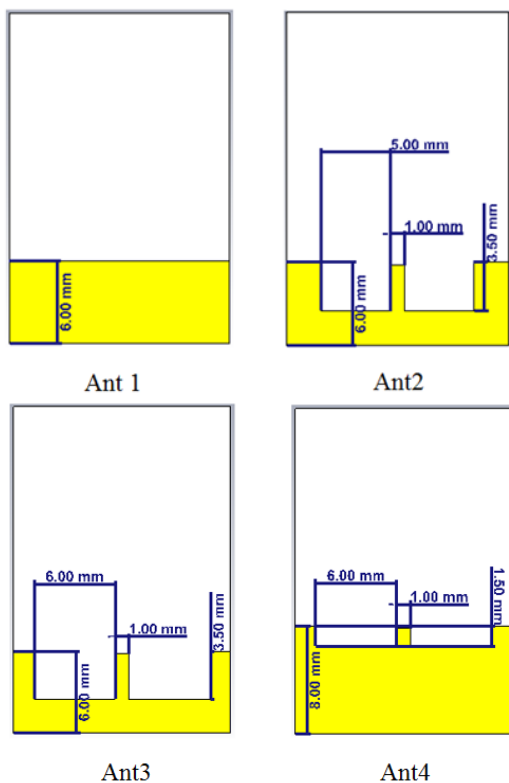
شکل ۶ - (الف) نمودار راندمان کل، (ب) نمودار بهره بیشینه آنتن پیشنهادی

۲-۲- عملکرد آنتن پیشنهادی بر روی بدن

جهت بررسی عملکرد آنتن پیشنهادی بر روی بدن، از مدل فانتوم بافت قفسه سینه استفاده شده است. مدل فانتوم استفاده شده در این مقاله دارای دقت بالایی بوده و شامل استخوان، ماهیچه، چربی و پوست است که مشخصه‌های الکتریکی و چگالی هریک از آنها در جدول ۲ آورده شده است [۲۹]. شایان ذکر است که جهت محاسبه رسانندگی الکتریکی از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

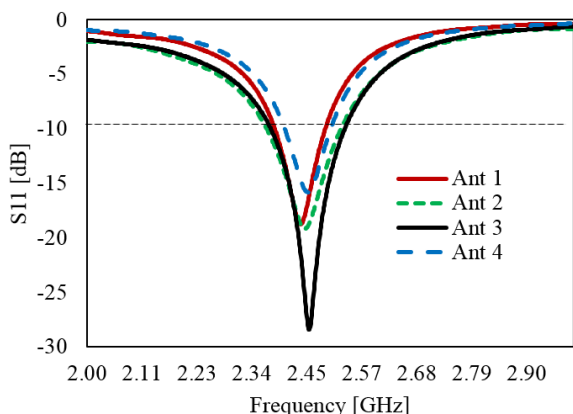
$$\sigma = \frac{1}{\rho_s t} \quad (1)$$

که در این رابطه σ رسانندگی و واحد آن S/m، ρ_s مقاومت سطحی و واحد آن $\frac{\Omega}{m^2}$ ، و t ضخامت ماده می‌باشد. بنابراین رسانندگی رابطه عکس با مقاومت سطحی دارد، هرچه مقاومت کاهش یابد، رسانندگی افزایش یافته و در نتیجه تلفات الکتریکی کاهش می‌یابد و به این ترتیب راندمان تشعشعی آنتن افزایش می‌یابد [۱۷]. نمونه مدل قفسه سینه در شکل ۷ نشان داده شده، که آنتن پوشیدنی در فاصله ۱۵ میلی متری از آن قرار گرفته است.



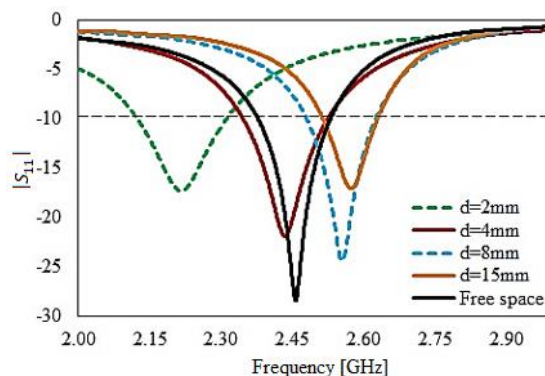
شکل ۱۰- بررسی هندسه‌های مختلف برای صفحه زمین آنتن پوشیدنی شماره ۲ جهت عملکرد در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز

شکل ۱۲ مسیر انحراف یافته جریان در صفحه زمین برای آنتن پوشیدنی طراحی شده را به خوبی نشان می‌دهد. در حقیقت برای عملکرد مناسب DGS جهت افزایش پهنای باند باید به دو نکته اساسی اشاره کرد. اول آنکه باید نوع هندسه شکاف در عین سادگی به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند در مسیر جریان اختلال به وجود آورده و این مسیر را افزایش دهد (مانند شکل ۱۲)، دوم آنکه ماده زیرلایه باید دارای ثابت دی‌الکتریک و تلفات کم باشد. به عنوان نمونه همانطور که در بخش‌های پیشین در همین مقاله مشاهده شد استفاده از زیرلایه‌های منسوج همچون نمد یا جین، می‌تواند پهنای باند بیشتری به دست دهند.

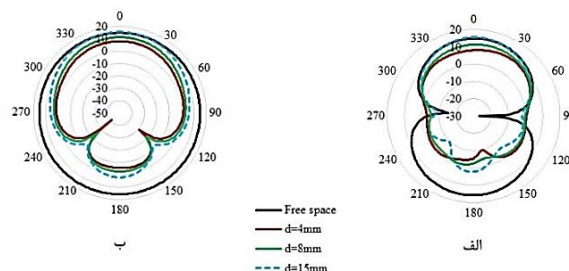


شکل ۱۱- اثر هریک از صفحات زمین شکل ۱۱ بر اندازه S_{11} آنتن پوشیدنی پیشنهادی

بافت تمامی مشخصه‌های تشعشعی از جمله الگوی تشعشعی تضعیف شده و تقریباً برای تمام فواصل، میزان تشعشعات عقبی تا حدود ۱۵ دسی بل کاهش یافته است. این مسئله به دلیل ثابت دی‌الکتریک بالای مدل بافت در فرکانس‌های پایین در مقایسه با ماده زیرلایه آنتن پیشنهادی بوده که نشان دهنده جذب انرژی این تشعشعات عقبی توسط بدن است. با این حال در تمامی فواصل، تشعشعات در نیم‌فضای جلویی آنتن حفظ شده است.



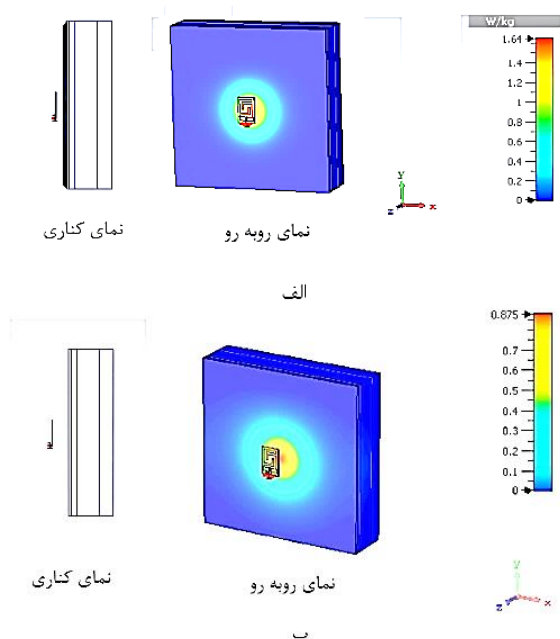
شکل ۸- مقایسه نمودار اندازه S_{11} برای آنتن در فضای آزاد و در هنگام قرارگیری در فواصل مختلف از مدل بافت قفسه سینه



شکل ۹- مقایسه الگوی تشعشعی دو بعدی آنتن در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز در فضای آزاد و هنگام قرارگیری در فواصل مختلف از بافت قفسه سینه: (الف) در صفحه E، (ب) در صفحه H

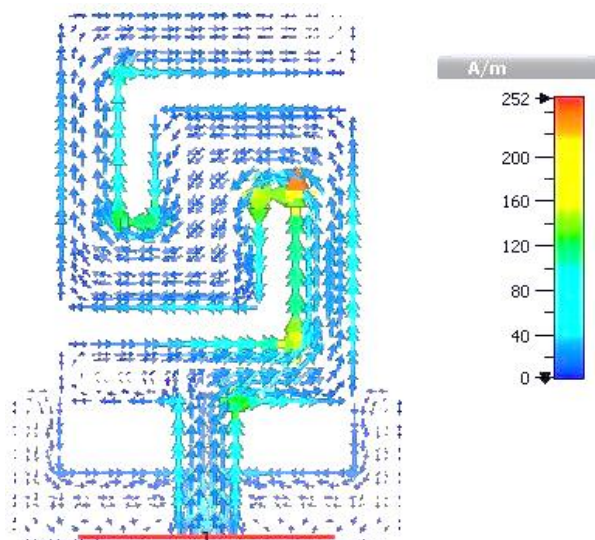
میزان راندمان کل برای آنتن در هنگام قرارگیری بر روی مدل بافت قفسه سینه در فواصل ۴، ۸ و ۱۵ میلی‌متری از آن، به ترتیب ۷٪، ۱۲.۹٪ و ۲۹٪ به دست آمده است که در مقایسه با فضای آزاد به واسطه محیط تلف دار بافت به شدت تضعیف شده است. همچنین میزان بهره برای آنتن پیشنهادی در حالت قرارگیری بر روی مدل قفسه سینه در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز در فاصله ۴ میلی‌متری حدود -5.2dBi به دست آمده است. این کاهش شدید بهره نسبت به فضای آزاد، ناشی از مکانیزم‌های جذب و بازتاب انرژی به دلیل اختلاف بسیار زیاد بین مشخصه‌های دی‌الکتریک هوا و بافت بدن است [۳۰]. گرچه میزان بهره در فاصله ۱۵ میلی‌متری از مدل بافت 2.2dBi به دست آمده است. به این ترتیب مطالعه فوق نشان می‌دهد که آنتن پوشیدنی پیشنهادی، در نزدیکی بدن نیز می‌تواند عملکرد مناسب و قابل قبولی را به دست دهد. لذا با توجه به ابعاد و حجم کوچکش می‌تواند به خوبی در دستگاه‌ها و سنسورهای WBAN مورد استفاده قرار گیرد.

ترتیب ۰.۸۷۵، ۱.۴۹ و ۲ وات بر کیلوگرم به دست آمده که بسیار کم و مطابق با استاندارد ICNIRP است. همچنین میزان SAR برای آنتن در هنگام قرارگیری در فاصله ۸ میلی متری از مدل بافت قفسه سینه در هر ۱۰ گرم از بافت تنها ۱.۶۴ وات بر کیلوگرم به دست آمده که کوچکتر از حد استاندارد ۲ وات بر کیلوگرم است. پس برای آنتن پیشنهادی اگر میزان توان ورودی بیش از ۲۳۵ میلی وات نباشد عملکردی کاملاً ایمن خواهد داشت. در شکل ۱۳ توزیع توان نباشد شده توسط مدل بافت قفسه سینه در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز و زمانی که آنتن در فواصل ۸ و ۱۵ میلی متری از آن قرار دارد نشان داده شده است. مشاهده می شود که میزان کمی از توان در مرکز آنتن توسط مدل بافت جذب شده است. به علاوه، عمق نفوذ توان نیز مناسب بوده و می تواند در کاربردهایی چون تصویربرداری های مایکروویو مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۳- توزیع توان جذب شده توسط مدل فانتوم بافت قفسه سینه در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز برای آنتن در فاصله (الف) ۸ میلی متری، (ب) ۱۵ میلی متری

به این ترتیب مشاهده می شود که آنتن پیشنهادی در فواصل مناسب ۸ و ۱۵ میلی متری از بدن می تواند عملکرد ایمنی را به دست دهد. بنابراین این آنتن علاوه بر عملکرد کاملاً مناسب در فضای آزاد، در نزدیکی بدن نیز عملکرد قابل قبولی را به دست داده و در عین حال ایمنی کاربران نیز حفظ شده است. به این ترتیب آنتن پیشنهادی می تواند در سناریوهای بر بدن^۱ و خارج از بدن^۲ در کاربردهای پزشکی شبکه های بی سیم تن پوش مورد استفاده قرار گیرد. جدول ۳، مقایسه ای از آنتن پیشنهادی با پژوهش های پیشین را از لحاظ ابعاد، راندمان کل و پهنای باند نسبی نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود آنتن پیشنهادی ابعاد بسیار کوچکتری نسبت به پژوهش های پیشین داشته و همزمان عملکرد مناسبی را به دست داده است.



شکل ۱۲- توزیع چگالی جریان سطحی در المان پیچ و صفحه زمین آنتن در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز

۳- ارزیابی مقدار SAR

در بخش انتهایی، جهت اطمینان حاصل از عملکرد ایمن آنتن پیشنهادی در نزدیکی بدن، میزان SAR برای آن محاسبه شده است. آهنگ جذب ویژه یا به اختصار SAR، آهنگ میزان جذب انرژی امواج الکترومغناطیسی توسط بدن است هنگامیکه در معرض این امواج قرار گیرد. در واقع SAR، مقیاسی است که به وسیله آن می توان میزان ضرر رسانی دستگاه مورد نظر بر بدن را سنجید. به این ترتیب SAR، بیان کننده میزان انرژی الکترومغناطیسی جذب شده توسط بدن انسان است که واحد آن وات بر کیلوگرم می باشد. هر چه SAR بالاتر باشد، میزان جذب این انرژی توسط بدن بیشتر است و نشان دهنده خطرناک تر بودن آن دستگاه برای بدن انسان می باشد. در استاندارد FCC، حداکثر مقدار SAR برای متوسط هر گرم از بافت بیولوژیکی، ۱۶ وات بر کیلوگرم است و در استاندارد ICNIRP، حداکثر مقدار SAR، برای متوسط هر ده گرم از بافت بیولوژیکی، ۲ وات بر کیلوگرم تعریف شده است. رابطه (۲) که مسقیماً برخواسته از تعریف SAR است می تواند برای محاسبه میزان آن به کار رود [۱۳]:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) [W/Kg] \quad (2)$$

که در رابطه فوق، W انرژی الکترومغناطیسی نفوذ کرده در بافت و ρ و V به ترتیب چگالی و حجم بافت می باشند.

جهت محاسبه مقدار SAR از مدل فانتوم قفسه سینه که در بخش پیشین توضیح داده شد استفاده شده و میزان SAR برای فواصل مختلف از نمونه بافت قفسه سینه، با توان های ورودی مختلف با استفاده از نرم افزار CST محاسبه شده است. مطالعات نشان می دهد که میزان SAR برای آنتن پیشنهادی در فاصله ۱۵ میلی متری از بافت با توان های ورودی ۸۰، ۱۰۰ و ۲۳۵ میلی وات برای هر ۱۰ گرم از بافت به

² Off-Body

¹ On-Body

- [2] M. Särestöniemi, C. Pomalaza-Ráez, Ch. Kissi, M. Berg, et al., "WBAN Channel Characteristics between Capsule Endoscope and Receiving Directive UWB On-Body Antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55953-55968, 20 March 2020.
- [3] A. Sharma, E. Kampianakis, and M. S. Reynolds, "A dual-band HF and UHF Antenna system for implanted neural recording and stimulation devices," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, pp. 722-722, 28 June 2018.
- [4] M. El. Gharbi, M. Martinez-Estrada, R. Frenandez-Garcia, S. Ahyoud, et al., "A novel ultra-wide band wearable antenna under different bending conditions for electronic-textile applications," *The Journal of The Textile Institute*, vol. 112, pp. 437-443, May 2020.
- [5] IEEE Standards for Safety Levels with Request to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300GHz. IEEE Std. C95.1. 1999.
- [6] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)," *Health Phys.*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [7] A. Smida, A. Iqbal, A. J. Alazemi, M. I. Waly, et al., "Wideband Wearable Antenna for Biomedical Telemetry Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15687-15694, 17 January 2020.
- [8] A. Y. I. Ashyap, Z. Zainal Abidin, and S. H. Dahlan, "Inverted E-Shaped Wearable Textile Antenna for Medical Applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35214-35222, 14 June 2018.
- [9] X. Lin, Y. Chen, Z. Gong, and B. C. Seet, "Ultra-Wideband Textile Antenna for Wearable Microwave Medical Imaging Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4238-4249, 3 February 2020.
- [10] A. Bouazizi, G. Zaibi, A. Iqbal, and A. Basir, "A dual-band case-printed planar inverted-F antenna design with independent resonance control for wearable short-range telemetry systems," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, pp. 1-8, 13- April 2019.
- [11] J. Wu and K. Sarabandi, "Compact omnidirectional circularly polarized antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 1550-1557, April 2017.
- [12] E. F. Nor Mohd Hussin, P. J. Soh, M. F. Jamlos, and H. Lago, "Design of a Microstrip-based Wideband Wearable Antenna for the 2 to 3 GHz Band," in *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 31 March 2019, pp. 123-128.
- [13] G. Gao, C. Yang, B. Hu, R. Zhang, et al., "A Wide Bandwidth Wearable All-textile PIFA with Dual Resonance Modes for 5-GHz WLAN Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 4206-4211, 17 March 2019.
- [14] S. Yan and G. A. E. Vandenbosch, "Radiation Pattern-Reconfigurable Wearable Antenna Based on Metamaterial Structure," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1715-1718, 11 February 2016.
- [15] C. Mao, M. Khalily, V. Singh, and P. Xiao, "Low-Profile Vertically Polarized Wearable Antenna with Omnidirectional Radiation," in *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, Montreal, QC, Canada, 5-10 July 2020, pp. 34-38.
- [16] R. Jothi Chitra, V. Nagarajan, and D. Mukesh, "Design of Wearable Pentagonal Fractal Antenna for Soldier Location Tracking," in *International Conference on Communication*

جدول ۳ - مقایسه آنتن پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین مرتبط

مرجع	فرکانس عملکرد [GHz]	ابعاد [mm ³]	جنس زیرلایه	راندمان [%]	پهنای باند نسبی [%]
[۳۱]	۵/۲.۲/۴	۵۰×۵۰×۶	نمد	۱۷	۵/۴
[۱۴]	۲/۴۵	۱۰۰×۱۰۰×۳	نمد	۴۵	۵>
[۱۱]	۲/۴۵	۹۰×۷۰×۱.۵۷	RT 5880	۹۴	-
[۸]	۲/۴	۳۰×۲۰×۰.۷	جین	۷۹	۱۵
[۱۸]	۲/۴۵	۳۹×۳۹×۰/۵۰۳	RT 5880	۷۵	۷/۷۵
[۷]	۲/۴	۱۷×۲۵×۰.۷۸۷	RT 5880	۹۳	۵۹/۷
[۱۵]	۲/۴۵	۴۸×۴۸×۱.۵۲۵	RO4 003	-	۰/۸
[۹]	۲/۴	۷۰×۵۰×۰.۵	پلی-استر	۷۰/۹۶	۱۰۹
این مقاله	۲/۴۵	۱۶×۲۴×۰.۵	RO4 003	۷۳.۸۲	۶/۲

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن پوشیدنی بسیار کوچک و کم حجم با ابعاد کلی $۱۶ \times ۲۴ \times ۰.۵$ میلی متر مکعب یا $۰.۱۳ \lambda_0 \times ۰.۱۹۶ \lambda_0 \times ۰.۰۴ \lambda_0$ که در آن λ_0 طول موج عملکردی در فضای آزاد و در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز بوده، جهت عملکرد در باند پزشکی ۲.۴ گیگاهرتز ISM ارائه شده است. آنتن پیشنهادی بر پایه زیرلایه راجرز RO4003 طراحی شده است. در این طراحی از یک طرح DGS مستطیل شکل استفاده شده که به واسطه آن عملکرد در باند فرکانسی مد نظر حاصل شده و به این ترتیب آنتن پیشنهادی دارای پهنای باند نسبی ۶.۲٪ با فرکانس مرکزی ۲.۴۵ گیگاهرتز است. همچنین آنتن پیشنهادی، یک الگوی تشعشعی همه-جهته را در سرتاسر باند عملکردی به دست داده است. به علاوه، میزان بهره و راندمان کل در فرکانس ۲.۴۵ گیگاهرتز به ترتیب ۱.۰۸ dBi و بیش از ۷۳٪ بوده است. در ادامه عملکرد آنتن پیشنهادی بر روی مدل فانتوم بافت قفسه سینه نیز مورد بررسی قرار گرفت، که عملکرد قابل قبولی را در فواصل مناسب ۸ و ۱۵ میلی متری از آن به دست داده است. در انتها میزان SAR برای آنتن پیشنهادی محاسبه و نشان داده شد که این آنتن عملکردی ایمن را به دست می‌دهد. به این ترتیب آنتن پوشیدنی پیشنهادی با توجه به حجم کم، ابعاد کوچک و نیز طراحی ساده و عملکرد کاملاً مناسب خود، می‌تواند نامزد بسیار مناسبی برای کاربردهای WBAN باشد.

۶- مراجع

- [1] D. M. G. Preethichandra, L. Piyathilaka, U. Izhar, R. Samarasinghe, et al., "Wireless Body Area Networks and Their Applications-A Review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9202-9220, 23 January 2023.

- [25] A. Y. I. Ashyap, S. H. Dahlan, Z. Zainal Abidin, and M. H. Dahri, "Robust and Efficient Integrated Antenna with EBG-DGS Enabled Wide Bandwidth for Wearable Medical Device Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56346-56358, 19 March 2020.
- [26] D. Mathur, S. K. Bhatnagar, and V. Sahula, "Quick Estimation of Rectangular Patch Antenna Dimensions Based on Equivalent Design Concept," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1469-1472, 1 July 2014.
- [27] M. Mathur, A. Vats, and A. Agarwal, "A New Design Formulae for Feed Line Dimensions of the Rectangular Microstrip Patch Antenna by using Equivalent Design Concept," in *2015 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, Noida, India, 16-18 March 2015, pp. 56-60.
- [28] J. Dong, Q. Li, and L. Deng, "Compact Planar Ultra-Wideband Antennas with 3.5/5.2/5.8 GHz Triple Band-Notched Characteristics for Internet of Things Applications," *Sensors*, vol. 17, no. 2, pp. 349, 10 February 2017.
- [29] Z. H. Jiang, D. E. Brocker, P. E. Sieber, and D. H. Werner, "A Compact, Low-Profile Metasurface-Enabled Antenna for Wearable Medical Body-Area Network Devices," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 8, pp. 4021-4030, 2 June 2014.
- [30] Z. Hamouda, J. Wojkiewicz, A. A. Pud, L. Koné, et al., "Magnetodielectric Nanocomposite Polymer Based Dual-Band Flexible Antenna for Wearable Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 7, pp. 3271-3277, 13 April 2018.
- [31] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Compact all-textile dual-band antenna loaded with metamaterial inspired structure," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1486-1489, 12 November 2014.
- and *Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, India, 28-30 July 2020, pp. 167-171.
- [17] A. Dolatchah and B. Dorostkar, "Analysis of a microstrip antenna with an incomplete ground plane structure that can be used in electronic defense systems," *Journal of Modern Researches on Electronics Defence Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 22-27, March 2024. (In Persian)
- [18] A. Arif, M. Zubiar, M. Ali, M. U. Khan, et al., "A Compact, Low-Profile Fractal Antenna for Wearable On-Body WBAN Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 5, pp. 981-985, 27 March 2019.
- [19] Z. Soltani and Sh. Asadi, "Spurious Mode Rejection in an Oversized Dielectric Resonator by Microstrip Metallic Pattern," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 7, no. 2, pp. 9-15, May 2020. (In Persian)
- [20] H. K. Nie, X. W. Xuan, and G. J. Ren, "Wearable antenna pressure sensor with electromagnetic bandgap for elderly fall monitoring," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 138, no. 8, pp. 153861, August 2021.
- [21] A. Y. I. Ashyap, Z. Zainal Abidin, S. H. Dahlan, M. I. Abbasi, et al., "An Overview of Electromagnetic Band-Gap Integrated Wearable Antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 7641-7658, 6 January 2020.
- [22] A. Y. I. Ashyap, Z. Zainal Abidin, and S. H. Dahlan, "Highly efficient wearable CPW antenna enabled by EBG-FSS structure for medical body area network applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77529-77541, 25 November 2018.
- [23] G. Gao, B. Hu, S. Wang, and C. Yang, "Wearable Circular Ring Slot Antenna with EBG Structure for Wireless Body Area Network," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 434-437, 15 January 2018.
- [24] P. Sambandam, M. Kanagasabai, S. Ramadoss, and R. Natarajan, "Compact Monopole Antenna Backed with Fork Slotted EBG for Wearable Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 228-232, 25 November 2020.