

## Original Research Paper

## Compact Dual-Band Wearable Antenna for Wireless Body Area Network Applications

Farzad Mohajeri\*  and Maryam Darabi

Department of Communications and Electronics Engineering, Faculty of Electronics and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

**ARTICLE INFO****Article History:**

Received 14 June 2024

Revised 29 August 2024

Accepted 09 September 2024

Available Online 18 September 2024

**Keywords:**

Microstrip antenna

Dual-band antenna

Wearable antenna

Wireless body area networks

Scientific absorption rate

**ABSTRACT**

This study introduces a compact, low-profile monopole antenna for wireless body area network (WBAN) applications. The proposed antenna is derived from a conventional microstrip rectangular patch design and operates in two industrial, scientific, and medical (ISM) frequency bands: 2.4 GHz (2.4–2.5 GHz) and 5.8 GHz (5.725–5.875 GHz). The antenna's overall dimensions are  $16 \times 26 \times 0.8 \text{ mm}^3$  or  $0.13\lambda_0 \times 0.212\lambda_0 \times 0.0065\lambda_0$ , where  $\lambda_0$  represents the free-space wavelength at 2.45 GHz. These dimensions ensure a compact and space-efficient design. The antenna achieves fractional bandwidths of 4.89% and 69.13% at 2.4 GHz and 5.8 GHz, respectively. The radiation pattern is omnidirectional at both frequency bands, with a maximum gain exceeding 4 dBi. The antenna's performance was further evaluated on a phantom model of chest tissue, demonstrating stable operation over body tissues. The specific absorption rate (SAR) at both frequency bands was also analyzed, confirming compliance with safety standards. The compact size and robust performance make the proposed antenna a promising candidate for integration into WBAN sensors and devices. All simulations were performed using CST Microwave Studio software.

\*Corresponding Author's E-mail: [mohajeri@shirazu.ac.ir](mailto:mohajeri@shirazu.ac.ir)**How to Cite this Article:**F. Mohajeri and M. Darabi, "Compact dual-band wearable antenna for wireless body area network applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 28-39, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1487>.**COPYRIGHTS**© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## آنتن پوشیدنی فشرده دوبانده جهت کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش

فرزاد مهاجری<sup>۱\*</sup> و مریم دارابی<sup>۲</sup>

۱- استاد، گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران  
۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

## چکیده

در این مقاله یک آنتن تک قطبی فشرده و کوچک جهت کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش ارائه شده است. این آنتن بر پایه آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم به گونه‌ای طراحی شده تا در دو باند فرکانسی پزشکی، یعنی باندهای ۲/۴ (۲/۵-۲/۴) و ۵/۸ (۵/۷۲۵-۵/۸۷۵) گیگاهرتز عمل کند. ابعاد کلی این آنتن  $۱۶ \times ۲۶ \times ۰/۸$  میلی‌متر مکعب یا  $۰/۰۶۵\lambda_0 \times ۰/۲۱۲\lambda_0 \times ۰/۱۳\lambda_0$  بوده که در آن  $\lambda_0$  طول موج در فضای آزاد و در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز بوده که بسیار کوچک و کم‌حجم است. همچنین، پهنای باند نسبی آنتن در باندهای فرکانسی ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز به ترتیب ۴/۸۹ و ۶۹/۱۳ درصد می‌باشد. همچنین آنتن پیشنهادی در هر دو باند فرکانسی یک الگوی تشعشی همه‌جهته را با بیشینه بهره بیش از ۴ dBi به دست می‌دهد. در این مقاله، عملکرد آنتن بر روی یک مدل فانتوم از قفسه سینه نیز مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که آنتن عملکردی با ثبات بر روی بافت بدن دارد. همچنین سطح آهنگ جذب ویژه در هر دو باند فرکانسی محاسبه شده است. با توجه به ابعاد بسیار کوچک و عملکرد مناسب آن، آنتن طراحی شده می‌تواند نامزد بسیار مناسبی برای دستگاه‌ها و سنسورهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش باشد. تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST صورت گرفته است.

## اطلاعات مقاله

## تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۵ خرداد ۱۴۰۳  
بازنگری ۸ شهریور ۱۴۰۳  
پذیرش ۱۹ شهریور ۱۴۰۳  
اولین انتشار ۲۸ شهریور ۱۴۰۳

## واژه‌های کلیدی:

آنتن مایکرواستریپ  
آنتن دو بانده  
آنتن پوشیدنی  
شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش  
آهنگ جذب ویژه

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [mohajeri@shirazu.ac.ir](mailto:mohajeri@shirazu.ac.ir)

## How to Cite this Article:

F. Mohajeri and M. Darabi, "Compact dual-band wearable antenna for wireless body area network applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 28-39, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1487>.



## COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



## علائم و اختصارات

(DGS) Defected Ground Structure	صفحه زمین معیوب
(EBG) Electromagnetic band-gap	باند ممنوعه الکترومغناطیسی
(HBC) Human bond communications	ارتباط بدن انسان
(ISM) Industrial, Scientific and Medical	پزشکی علمی - صنعتی
Off-Body	خارج از بدن
On-Body	بر بدن
(SAR) Specific Absorption Rate	آهنگ جذب ویژه
(WBAN) Wireless Body Area Network	شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش

## مقدمه

رشد سریع در حوزه حسگرهای فیزیولوژیک، مدارات مجتمع توان پایین و ارتباطات بی‌سیم، نسل جدیدی از شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ایجاد نمود که با عنوان شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش (WBAN) شناخته می‌شوند [۱]. در دو دهه اخیر توجه بسیاری به سمت سیستم‌های ارتباطی پوشیدنی خواه از نوع بر بدن یا خارج از بدن جلب شده است. به این ترتیب، شبکه‌های WBAN در گستره عظیمی از کاربردها در حوزه سینما، سرگرمی، ورزش، تشخیص حرکت و کاربردهای پزشکی از قبیل پایش و تشخیص به کار می‌روند. به عبارت بهتر، این شبکه‌ها آینده زندگی روزمره ما خواهند بود [۲].

در شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش، سه رده ارتباطی جهت دریافت اطلاعات از بدن و ارسال آن‌ها به مراکز و پایگاه‌های داده وجود دارد، که از جمله آن‌ها می‌توان به پروتکل‌های بلوتوث، ارتباط بدن انسان (HBC) و IEEE802.11 اشاره نمود [۳]. آنتن‌ها به عنوان یک وسیله فرستنده/گیرنده در ارتباطات چنین شبکه‌هایی نقشی اساسی را بر عهده دارند. لذا بنا بر آنچه که توضیح داده شد، آنتن‌های مورد استفاده در چنین شبکه‌هایی باید قادر به عملکرد در باندهای مختلف چون ۸۰۰-۲۲۰۰ مگاهرتز مخصوص شبکه‌های تلفن همراه، و باندهای ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز مخصوص ارتباطات شبکه باشند [۴].

در شبکه‌های WBAN، طراحی و ساخت یک آنتن با ابعاد کوچک، اشغال کمترین فضای ممکن و نیز داشتن عملکرد چندگانه یک چالش اساسی و مهم است. بنابراین آنتن‌های پوشیدنی مورد استفاده در شبکه‌های نزدیک به بدن باید به اندازه کافی کوچک و کم حجم بوده و نیز وزن کمی داشته باشند [۵]. به علاوه این آنتن‌ها باید دارای

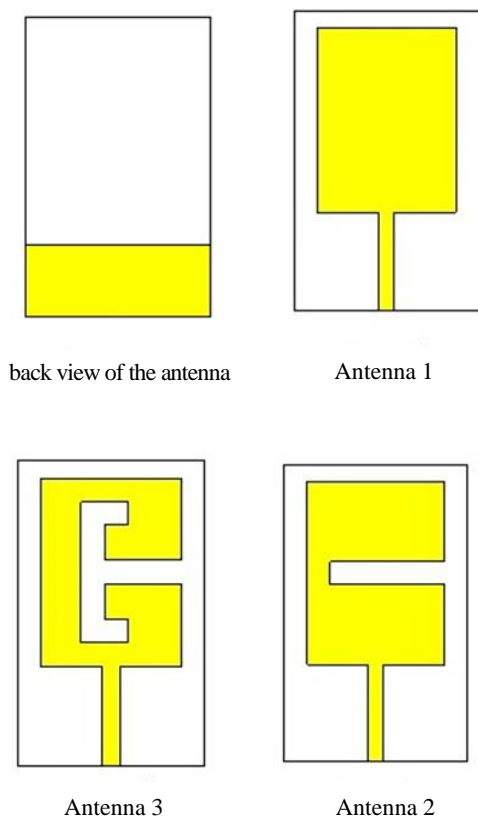
استقامت مکانیکی مناسب بوده و حتی الامکان قابل انعطاف هم باشند. به دلیل عملکرد در نزدیکی بدن انسان، که محیطی تلفدار برای امواج الکترومغناطیسی است، این آنتن‌ها باید عملکرد قابل قبولی را در نزدیکی بافت بدن به دست دهند [۶]. همچنین پر واضح است که ایمنی کاربران نیز باید حفظ شود، از این رو کمیته سطح آهنگ جذب ویژه (SAR) که نشان‌دهنده میزان ضرررسانی آنتن و دستگاه‌های مختلف در نزدیکی بدن است باید مطابق با استانداردهای بین‌المللی FCC و ICNIR باشد [۷،۸]. در سال‌های اخیر تکنیک‌های مختلفی جهت کوچک‌سازی آنتن و همزمان دستیابی به عملکرد مناسب، مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به مواردی چون استفاده از تکنیک صفحه زمین ناقص (PGS) [۹،۱۰]، تکنیک فراکتال کردن پیچ [۱۱،۱۲]، تکنیک صفحه زمین معیوب (DGS) [۱۳،۱۴]، فرامواد [۱۵-۱۷] و استفاده از ساختارهای باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG) [۱۸-۲۲]، اشاره نمود. دستیابی به یک آنتن پوشیدنی با عملکردی دو بانده در شبکه‌های بر بدن و خارج از بدن می‌تواند استفاده از آن‌ها را در کاربردهای گوناگون عملی نماید و از این رو پژوهش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. تا کنون دستیابی به یک عملکرد دو بانده برای آنتن‌های پوشیدنی با استفاده از ایجاد شکاف‌های مناسب در پیچ [۲۳]، استفاده از المان‌های پارازیتیک [۲۴]، فرامواد [۲۵] و یا استفاده از pin‌های اتصال کوتاه [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله، یک آنتن پوشیدنی با ابعاد بسیار کوچک و حجم کم جهت عملکرد در دو باند فرکانسی ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز که مختص فعالیت‌های پزشکی علمی - صنعتی (ISM) پیشنهاد شده است. آنتن پیشنهادی به خوبی هر دو باند مذکور را پوشش داده و عملکرد بسیار مناسبی را از لحاظ پهنای باند، الگوی تشعشعی، راندمان و بهره به دست داده است. ابعاد کلی آنتن پیشنهادی تنها  $0.16 \times 0.26 \times 0.18 \lambda_0$  میلی‌متر مکعب یا  $0.065 \lambda_0 \times 0.212 \lambda_0 \times 0.137 \lambda_0$  است که در آن  $\lambda_0$  طول موج عملکردی در فضای آزاد و در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز است. در این طراحی از تکنیک صفحه زمین ناقص و تکنیک افزایش طول عبوری جریان سطحی پیچ جهت دستیابی به یک عملکرد دوبانده استفاده شده است. همچنین در این مقاله مطالعات پارامتری جهت بررسی رفتار آنتن در هر دو باند فرکانسی، با استفاده از نرم‌افزار CST صورت گرفته است. در نهایت عملکرد آنتن پیشنهادی بر روی یک نمونه فانتوم از بافت بدن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته که عملکرد با ثبات و قابل قبولی حاصل شده است. همچنین میزان SAR برای آنتن پیشنهادی در هر دو باند فرکانسی عملکرد محاسبه شده است. به این ترتیب با توجه به عملکرد مناسب، ابعاد کوچک و سادگی طراحی، آنتن پیشنهادی می‌تواند نامزد بسیار مناسبی جهت ارتباطات بر بدن و خارج از بدن باشد.

## طراحی آنتن

طراحی اولیه از یک آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم آغاز شده‌است، که هندسه آن در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود. در این طراحی از زیر لایه راجرز RO4003 (ثابت دی‌الکتریک  $3/55$  و تانژانت تلفی  $0/0027$ ) با ضخامت  $0/8$  میلی‌متر، و نیز از ورقه‌های مس با ضخامت  $35$  میکرومتر برای المان‌های هادی استفاده شده‌است. آنتن مایکرواستریپ مرسوم جهت داشتن عملکرد مناسب، باید ابعادی در حدود نصف طول موج در فرکانس تشدید را داشته باشد. این ابعاد برای استفاده در کاربردهای پوشیدنی و WBAN بسیار بزرگ خواهد بود و به همین دلیل جهت کوچک‌سازی آنتن از تکنیک افزایش طول عبوری جریان که در [۲۷] به تفصیل توضیح داده شده، استفاده می‌شود. ابعاد آنتن مایکرواستریپ مرسوم جهت داشتن عملکرد در فرکانس  $2/45$  گیگاهرتز باند ISM با استفاده از فرمولاسیون‌های ارائه شده در [۲۸، ۲۹] محاسبه و توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز CST بهینه شده‌است. ابعاد حاصله برای آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم  $62 \times 50 \times 0/8$  میلی‌متر مکعب می‌باشد. نمودار اندازه  $S_{11}$  آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم در شکل ۱-ب نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است آنتن با طولی نزدیک به نصف طول موج در فرکانس  $2/45$  گیگاهرتز یک تشدید به میزان  $-13$  دسی‌بل را به دست داده‌است.

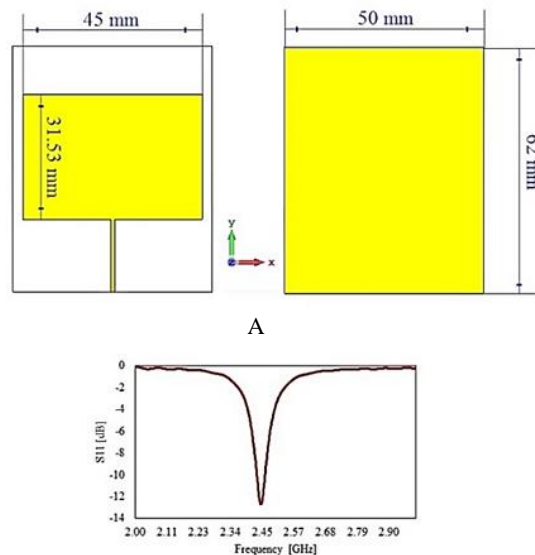
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود جهت طراحی آنتن پیشنهادی با ابعاد کوچک، از تکنیک صفحه زمین ناقص استفاده شده‌است. استفاده از این تکنیک همچنین با کاهش ضریب کیفیت آنتن، پهنای باند آن را نیز افزایش می‌دهد. در این طراحی جهت تغذیه آنتن به سادگی از یک خط مایکرواستریپ  $50$  اهمی استفاده شده‌است. مراحل طراحی آنتن پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود جهت افزایش طول عبوری جریان و در نتیجه افزایش طول الکتریکی پیچ از یک شکاف T شکل که  $90$  درجه چرخیده، استفاده شده‌است. به این ترتیب، بیش از  $86\%$  کاهش ابعاد در مقایسه با آنتن مایکرواستریپ مرسوم حاصل می‌شود. ابعاد کلی آنتن پیشنهادی تنها  $16 \times 26 \times 0/8$  میلی‌متر مکعب یا  $0/065 \lambda_0 \times 0/212 \lambda_0 \times 0/13 \lambda_0$  بوده که در آن  $\lambda_0$  طول موج عملکردی در فضای آزاد و در فرکانس  $2/45$  گیگاهرتز است.



شکل ۲- مراحل طراحی آنتن پیشنهادی.

Fig. 2. Design steps for the proposed antenna.

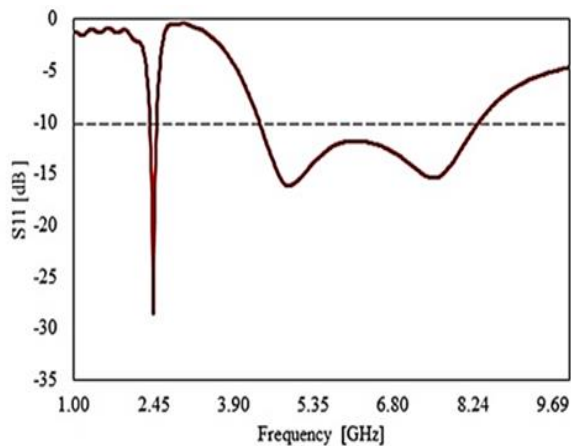
شکل ۳ نمودار اندازه  $S_{11}$  را برای مراحل مختلف طراحی نشان می‌دهد. همانطور که از این نمودار مشخص است با معرفی صفحه زمین ناقص، یعنی آنتن ۱، در حوالی فرکانس‌های ۴ و ۷ گیگاهرتز دو تشدید با



B

شکل ۱- (الف) هندسه آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم، (ب) نمودار اندازه  $S_{11}$  آنتن، استخراج شده از نرم‌افزار CST.

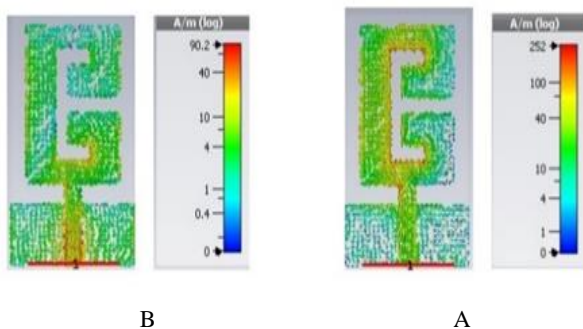
Fig. 1. (a) Conventional rectangular microstrip antenna, (b) magnitude of the antenna  $S_{11}$ , obtained by CST software.



شکل ۵- نمودار اندازه S<sub>11</sub> آنتن پیشنهادی.

Fig. 5. The magnitude of S<sub>11</sub> for the proposed antenna.

برای آن که دید بهتری از رفتار کلی ساختار حاصل شود، نحوه توزیع جریان سطحی برای هر دو باند فرکانسی استخراج شده است. شکل ۶- الف و ب توزیع جریان سطحی را به ترتیب برای دو فرکانس ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، بیشینه جریان در اطراف شکاف T شکل متمرکز شده است، از این رو شکاف T شکل در پیچ، بیشترین تأثیر را بر عملکرد در باند فرکانسی پایین‌تر (۲/۴ گیگاهرتز) دارد، حال آن که مطابق با شکل ۶-ب بیشینه جریان در اطراف خط تغذیه و نیز صفحه زمین ناقص متمرکز شده است، لذا برای باند فرکانسی بالاتر (۵/۸ گیگاهرتز)، صفحه زمین ناقص عامل تعیین‌کننده و تشدید و پهنای باند آنتن است.

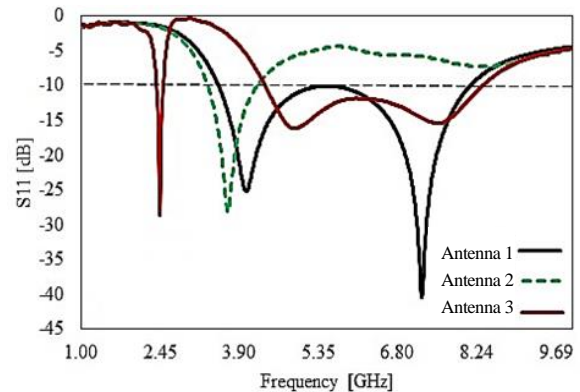


شکل ۶- توزیع چگالی جریان سطحی در فرکانس‌های: (الف) ۲/۴۵، (ب) ۵/۸ گیگاهرتز.

Fig. 6. Surface current density distribution at frequencies: (a) 2.45, (b) 5.8 GHz.

به جهت بررسی رفتار آنتن پیشنهادی در هر یک از باندهای فرکانسی، در ادامه یک مطالعه پارامتری صورت گرفته تا تأثیر هر

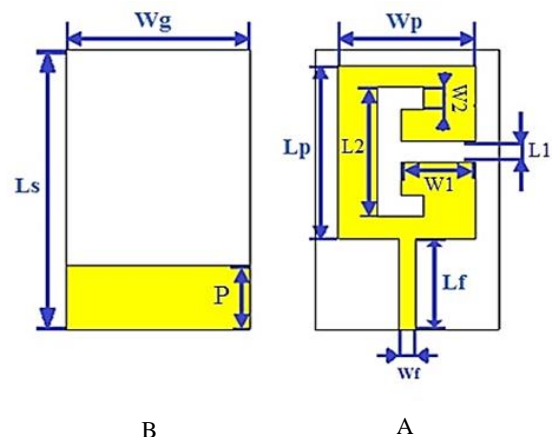
پهنای باند کمتر از ۱۰- دسی‌بل در حدود ۴/۶۱ گیگاهرتز (۳/۵۲ تا ۸/۱۳ گیگاهرتز) حاصل شده است. اما با معرفی شکاف T شکل در پیچ آنتن علاوه بر پوشش این ناحیه فرکانسی، یک عملکرد در باند ۲/۴ گیگاهرتز ISM را با فرکانس مرکزی ۲/۴۵ گیگاهرتز نیز به دست آمده است.



شکل ۳- مقایسه نمودار اندازه S<sub>11</sub> برای مراحل مختلف طراحی.

Fig. 3. Comparison of the magnitude of S<sub>11</sub> for the different steps of design.

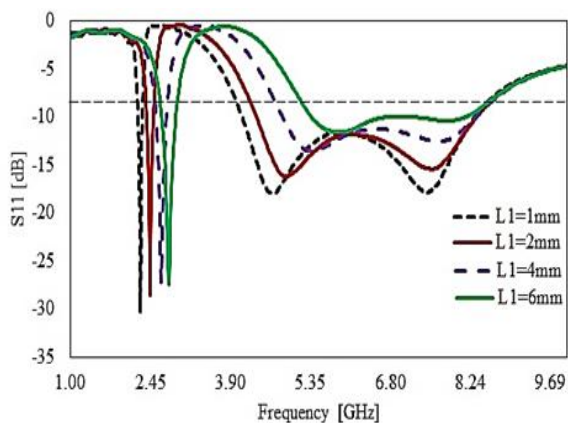
به این ترتیب با وجود صفحه زمین ناقص و نیز شکاف T شکل، یک عملکرد دو بانده حاصل شده است. هندسه نهایی آنتن پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با نمودار اندازه S<sub>11</sub> شکل ۵، آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی ۲/۴ گیگاهرتز، محدوده فرکانسی ۲/۳۹ تا ۲/۵۱ گیگاهرتز را در برمی‌گیرد. همچنین در باند فرکانسی ۵/۸ گیگاهرتز نیز محدوده فرکانسی ۴/۳۶ تا ۸/۳۷ گیگاهرتز را شامل می‌شود. به این ترتیب آنتن پیشنهادی به خوبی هر دو باند ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز ISM را پوشش می‌دهد.



شکل ۴- هندسه نهایی آنتن پیشنهادی: (الف) نمای روبه‌رو، (ب) نمای پشت.

Fig. 4. Final geometry of the proposed antenna: (a) front view, (b) back view.

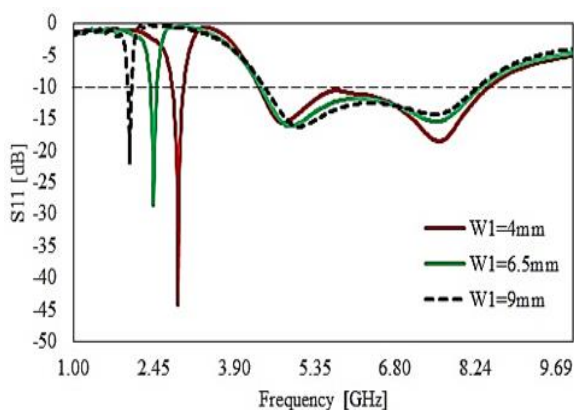
فرکانس تشدید به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شده‌است. از این‌رو این پارامتر باید به‌دقت انتخاب شود تا بهترین عملکرد را در هر دو باند فرکانسی به‌دست دهد.



شکل ۸- نمودار اندازه  $S_{11}$  برای تغییرات پارامتر  $L_1$ .

Fig. 8. The magnitude of  $S_{11}$  for  $L_1$  parameter changes.

مطابق با شکل ۹، مشاهده می‌شود که پارامتر  $W_1$ ، پارامتری تعیین‌کننده برای باند فرکانسی پایین‌تر بوده و تغییرات آن تأثیر چندانی بر عملکرد در باند فرکانسی بالاتر ندارد. دیده می‌شود که با افزایش  $W_1$  می‌توان عملکرد در فرکانس‌های پایین‌تر از ۲/۴۵ گیگاهرتز را به‌دست آورد.



شکل ۹- نمودار اندازه  $S_{11}$  برای تغییرات پارامتر  $W_1$ .

Fig. 9. The magnitude of  $S_{11}$  for  $W_1$  parameter changes.

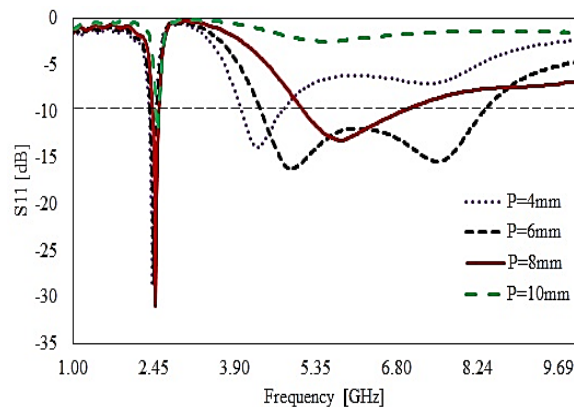
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، پارامتر  $L_2$  نیز تا حدی بر عملکرد آنتن خصوصاً در باند فرکانسی پایین‌تر اثرگذار بوده و می‌تواند جهت تنظیم فرکانس تشدید این باند فرکانسی در نظر گرفته شود.

یک از پارامترهای طراحی شکل ۴ بر عملکرد کلی آنتن مورد بررسی قرار گیرد.

## مطالعه پارامتری

به‌منظور دستیابی به طرحی بهینه برای آنتن پوشیدنی پیشنهادی، یک مطالعه پارامتری بر روی ابعاد مختلف صورت گرفته است. در هر یک از مطالعات، با ثابت نگهداشتن سایر ابعاد، تنها یک پارامتر را تغییر داده و اثر آن بر عملکرد آنتن بررسی می‌شود.

همانطور که از شکل ۴ برمی‌آید، یکی از پارامترهای مؤثر در طراحی، طول صفحه زمین ( $P$ ) می‌باشد. در شکل ۷ اثر تغییرات این پارامتر بر نمودار اندازه  $S_{11}$  نشان داده شده‌است. همانگونه که مشخص است، پارامتر  $P$  بر عملکرد آنتن در باند فرکانسی بالاتر (۵/۸ گیگاهرتز) اثرگذار بوده و تغییرات آن تأثیر چندانی بر باند فرکانسی پایین‌تر (۲/۴ گیگاهرتز) ندارد. با افزایش  $P$  تطبیق آنتن به‌شدت در این باند فرکانسی تخریب شده و با کاهش بیش از اندازه آن نیز، پهنای باند کوچک‌تر با یک فرکانس تشدید حاصل می‌شود. بنابراین برای  $P$  برابر با ۶ میلی‌متر بهترین عملکرد به‌دست آمده‌است.

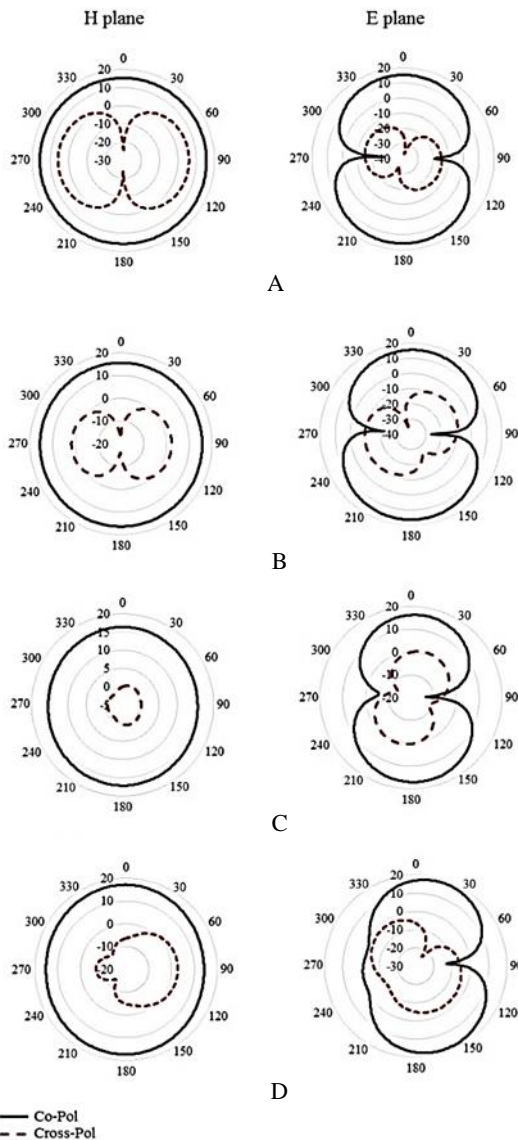


شکل ۷- نمودار اندازه  $S_{11}$  برای تغییرات پارامتر  $P$ .

Fig. 7. The magnitude of  $S_{11}$  for  $P$  parameter changes.

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در طراحی، ضخامت دسته شکاف  $T$  شکل یعنی پارامتر  $L_1$  است. براساس شکل ۸ مشاهده می‌شود که این پارامتر در هر دو باند فرکانسی مؤثر بوده و لذا حالتی تنظیم‌کنندگی دارد. با کاهش  $L_1$  پهنای باند عملکردی در باند فرکانسی بالاتر بیشتر شده و بالعکس پهنای باند کوچک‌تری در باند فرکانسی پایین‌تر حاصل شده‌است. با افزایش  $L_1$  پهنای باند عملکردی در باند پایین‌تر بیشتر می‌شود گرچه

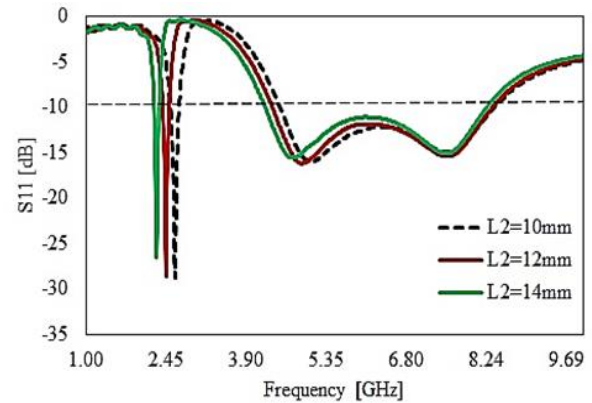
انگلیسی در صفحه E به دست آمده و همچنین ایزولاسیون خوبی بین سطوح پلاریزاسیون هم راستا و غیر هم راستا حاصل شده است.



**شکل ۱۱-** الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن پوشیدنی پیشنهادی در فرکانس‌های: (الف) ۲/۴۵، (ب) ۴/۳۷، (پ) ۵/۸، (ت) ۷/۵ گیگاهرتز.

**Fig. 11.** The two-dimensional radiation pattern for the proposed wearable antenna at frequencies: (a) 2.45, (b) 4.37, (c) 5.8, (d) 7.5 GHz.

راندمان کل برای آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز ۸۸/۱٪، و برای فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز نیز ۸۸/۴۲٪ به دست آمده است. منحنی تغییرات راندمان کل برحسب فرکانس در شکل ۱۲-الف ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود راندمان کل در سرتاسر هر دو باند فرکانسی تقریباً یکسان بوده و میزان آن بیشتر از ۸۰٪ است. بیشینه



**شکل ۱۰-** نمودار اندازه  $S_{11}$  برای تغییرات پارامتر  $L_2$ .

**Fig. 10.** The magnitude of  $S_{11}$  for  $L_2$  parameter changes.

به این ترتیب مشاهده شد که پارامترهای P و  $L_1$  بر عملکرد آنتن در باند ۵/۸ گیگاهرتز اثر گذارند. همچنین پارامترهای  $L_1$  و  $W_1$  بر عملکرد در باند ۲/۴ گیگاهرتز اثر می‌گذارند. از این رو جهت داشتن بهینه‌ترین عملکرد در هر دو باند فرکانسی، در تعیین این پارامترها باید مصالحه‌ای صورت گیرد. مقادیر بهینه تمامی پارامترهای طراحی آنتن پیشنهادی در جدول ۱ گزارش شده است.

**جدول ۱-** اندازه بهینه پارامترها برای آنتن پوشیدنی نهایی.

**Table 1.** Optimum sizing parameters for the final wearable antenna.

Parameter	Size[mm]	Parameter	Size[mm]
Ls	26	Wf	1.7
Ws	16	P	6
Lp	16	L1, W2	2
Wp	12	W1	6.5
Lf	8.5	L2	12

## عملکرد در فضای آزاد

دستیابی به یک الگوی تشعشی همه جهته، به واسطه استفاده از صفحه زمین ناقص، کاملاً قابل انتظار بوده است. این الگوی تشعشی در سرتاسر هر دو باند فرکانسی یکسان بوده و ثابت حفظ شده است. الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های ۲/۴۵، ۴/۳۷، ۵/۸ و ۷/۵ گیگاهرتز در شکل‌های ۱۱-الف تا ت رسم شده است. همانگونه که مشخص است برای تمامی فرکانس‌های مذکور، یک الگوی تشعشی همه جهته در صفحه H، و یک الگوی تشعشی مانند هشت

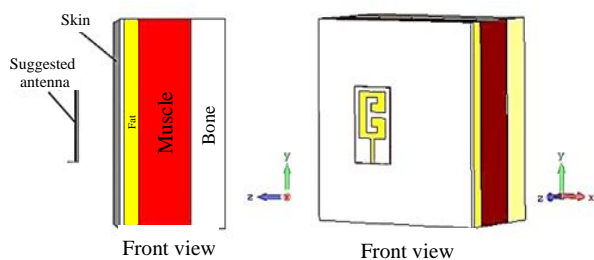
مورد استفاده در ساختار آنتن، فرکانس تشدید به سمت فرکانس‌های پایین جابه‌جا می‌شود. همچنین به‌واسطه رسانندگی و طبیعت تلفدار پوست انسان، بازتاب‌هایی از سطح آن رخ می‌دهد که خود سبب می‌شود آنتن از تنظیم فرکانس تشدید خود خارج شود [۳۰]. در این بخش از یک مدل فانتوم بافت قفسه سینه استفاده شده تا عملکرد آنتن پیشنهادی در نزدیکی بافت مورد بررسی قرار گیرد.

مدل قفسه سینه متشکل از استخوان، ماهیچه، چربی و پوست است که مشخصه‌های الکتریکی هریک شامل ثابت دی‌الکتریک و ضریب هدایت نسبی در فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۴ گیگاهرتز در جدول ۲ گزارش شده‌است [۳۱]. مدل قفسه سینه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که آنتن پیشنهادی بر روی آن و در فاصله ۱۵ میلیمتری از آن قرار گرفته است.

جدول ۲- خواص الکتریکی بافت [۳۱].

Table 2. Electrical properties of tissue [31].

Tissue	$\epsilon_r$ (2.45 GHz)	$\sigma_r$ (2.45 GHz)	$\epsilon_r$ (5.4 GHz)	$\sigma_r$ (5.4 GHz)
Bone	11.41	0.384	9.946	1.010
Muscle	52.79	1.705	49.27	4.266
Fat	5.28	0.102	5.010	0.254
Skin	38.06	1.440	35.61	3.218

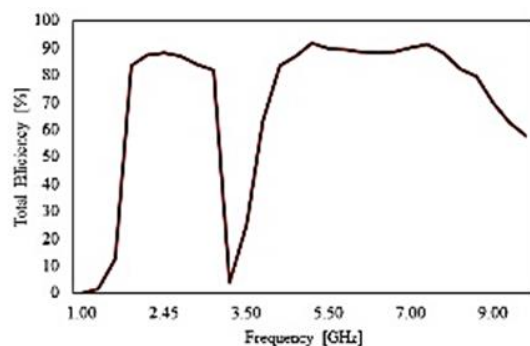


شکل ۱۳- قرارگیری آنتن پیشنهادی بر روی مدل فانتوم بافت قفسه سینه.

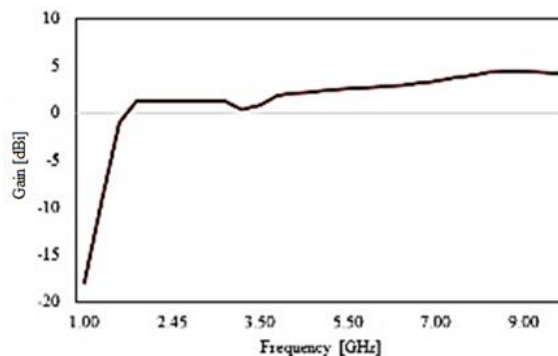
Fig. 13. Suggested antenna placement on chest tissue phantom model.

شکل ۱۴ مقایسه‌ای از نمودار اندازه S<sub>11</sub> آنتن در هنگام قرارگیری بر مدل بافت در فواصل ۸ و ۱۵ میلیمتری را با نتیجه حاصله از فضای آزاد نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هنگام قرارگیری آنتن در فواصل ۸ و ۱۵ میلیمتری بر روی مدل

راندمان کل، بیش از ۹۰٪ و در فرکانس ۷ گیگاهرتز حاصل شده‌است. منحنی تغییرات بهره برحسب فرکانس در شکل ۱۲-ب نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است میزان بهره در هر دو باند فرکانسی، در سرتاسر باند، حفظ شده و مقداری تقریباً ثابت دارد. میزان بیشینه بهره به‌دست آمده در باندهای عملکردی ۴/۳dBi است. در فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز میزان بهره به‌ترتیب ۱/۲۳dBi و ۲/۷۵dBi به‌دست آمده‌است. پس مشاهده می‌شود که با توجه به ابعاد کوچک و حجم کم آنتن پیشنهادی، عملکرد آن در هر دو باند فرکانسی بسیار مناسب بوده‌است و می‌تواند نامزد بسیار خوبی برای ارتباطات خارج از بدن در حوزه شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش باشد.



A



B

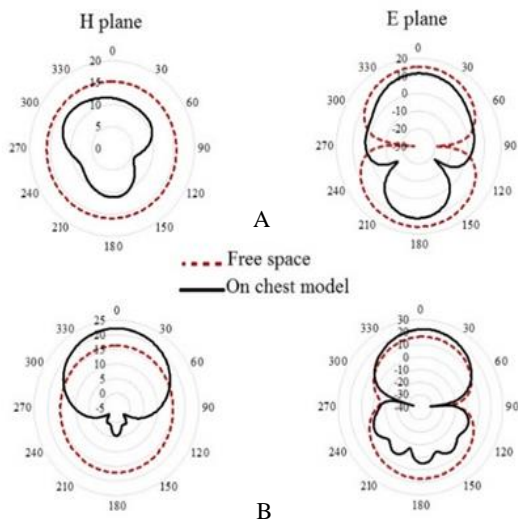
شکل ۱۲- منحنی تغییرات برحسب فرکانس برای: (الف) راندمان کل، (ب) بهره.

Fig. 12. Variations versus frequency for: (a) total efficiency, (b) gain.

## عملکرد بر روی بدن

برای سیستم‌های آنتنی در شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش، داشتن عملکرد مناسب و قابل قبول در نزدیکی بدن امری ضروری است. بافت انسان به‌دلیل مشخصه‌های پیچیده از قبیل ثابت دی‌الکتریک بالا و طبیعت تلفدار خود، پارامترهای عملکردی آنتن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌دلیل ثابت دی‌الکتریک بالای بافت نسبت به زیرلایه‌های

با این حال مطابق با شکل ۱۵-ب مشاهده می‌شود که برای آنتن در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز و در صفحات E و H میزان تشعشعات عقبی تا حدود ۱۰ دسی‌بل نسبت به فضای آزاد کاهش یافته و همزمان میزان تشعشعات جلویی نیز تا حدود ۵ دسی‌بل افزایش یافته است. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که در فرکانس‌های بالاتر به دلیل طبیعت تلفدار بافت و نیز ثابت دی‌الکتریک بالا و افزایش رسانندگی در این فرکانس‌ها، بازتاب‌ها از سطح پوست بیشتر شده و لذا در عین کاهش تشعشعات عقبی، تشعشعات در نیم‌فضای جلویی نیز افزایش یافته است.

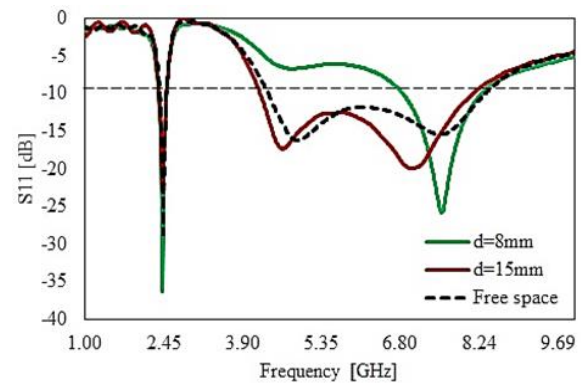


**شکل ۱۵-** مقایسه الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن در حالت قرارگیری بر مدل بافت با قرارگیری در فضای آزاد در فرکانس‌های: الف) ۲/۴۵ و ب) ۵/۸ گیگاهرتز.

**Fig. 15.** Comparison of the two-dimensional radiation pattern of the antenna in the state of placement on the tissue model with placement in free space at frequencies: (a) 2.45, (b) 5.8 GHz.

بهره آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز تنها ۰/۲۹dBi به دست آمده که نسبت به فضای آزاد کاهش چشمگیری داشته است، این مسئله به دلیل مکانیزم‌های جذب و بازتاب انرژی به دلیل اختلاف بسیار زیاد بین مشخصه‌های دی‌الکتریک هوا و بافت بدن است، گرچه مسئله در فرکانس‌های بالاتر متفاوت است. همانطور که توضیح داده شد به دلیل افزایش رسانندگی در فرکانس‌های بالاتر و غلبه مکانیزم بازتاب بر مکانیزم جذب، سمت‌گرایی آنتن افزایش یافته و لذا در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز بیشینه بهره ۷/۹۶dBi حاصل شده است. راندمان کل برای فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز به ترتیب میزان ۲۸/۱۳ و ۸۲/۴۱ درصد به دست آمده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در فاصله ۱۵ میلیمتری از مدل بافت، عملکرد آنتن کاملاً با ثبات بوده و لذا آنتن پیشنهادی می‌تواند به خوبی در ارتباطات بر بدن در حوزه WBAN نیز مورد استفاده قرار گیرد.

بافت، در باند فرکانسی پایین‌تر عملکردی کاملاً مشابه با فضای آزاد حاصل شده است و آنتن در این باند در همان فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز تشدید می‌کند. با این حال زمانی که آنتن در فاصله ۸ میلیمتری از بافت قرار دارد، نمودار اندازه S<sub>11</sub> در باند فرکانسی بالاتر بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته است و تنها در حوالی ۷/۵ گیگاهرتز یک تشدید حاصل شده است. علت این امر طبیعت تلفدار بافت و نیز ثابت دی‌الکتریک بالای آن نسبت به زیرلایه مورد استفاده در آنتن در فرکانس‌های بالا است که در نتیجه بر عملکرد کلی آنتن و فرکانس تشدید آن اثر می‌گذارد، اگرچه در فاصله ۱۵ میلیمتری از بافت عملکرد تقریباً مشابهی با فضای آزاد حاصل شده است. به این ترتیب مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد آنتن در فاصله ۱۵ میلیمتری از مدل بافت کاملاً با ثبات بوده و لذا آنتن پیشنهادی می‌تواند به خوبی در دستگاه‌ها و سنسورهای WBAN مورد استفاده قرار گیرد.

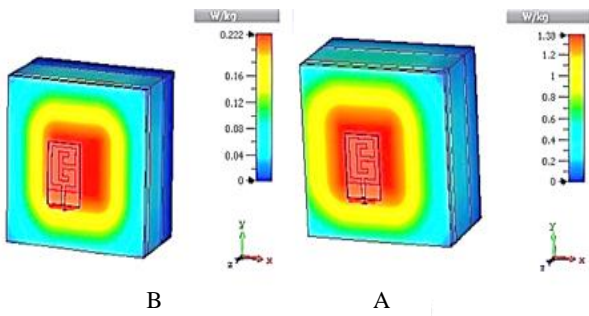


**شکل ۱۴-** مقایسه نمودار اندازه S<sub>11</sub> حاصله در فضای آزاد با حالت قرارگیری آنتن در فواصل مختلف از مدل بافت قفسه سینه.

**Fig. 14.** Comparison of the S<sub>11</sub> magnitude curves obtained in free space with the placement of the antenna at different distances from the chest tissue model.

در شکل ۱۵ الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن در هنگام قرارگیری بر مدل بافت و در فاصله ۱۵ میلیمتری از آن، برای فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز در هر دو صفحه E و H مشاهده می‌شود. چنانکه مشخص است، در هنگام قرارگیری آنتن بر بافت، الگوی تشعشی سمت گراتر شده و تشعشعات عقبی تا حدی تضعیف می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۵-الف مشاهده می‌شود در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز الگوی تشعشی در صفحه H، تا ۵ دسی‌بل نسبت به فضای آزاد تضعیف شده، گرچه این میزان تضعیف در صفحه E هم در تشعشعات عقبی حاصل شده است. این مسئله بدان معناست که تشعشعات عقبی توسط بدن جذب شده‌اند. از آنجا که فاصله مناسب ۱۵ میلیمتری بین آنتن و مدل بافت در نظر گرفته شده است میزان جذب تشعشعات عقبی توسط بدن مقداری کوچک است.

۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشخص است، توان جذب شده در فرکانس‌های پایین‌تر به عمق بیشتری از بافت نفوذ کرده و میزان این نفوذ در فرکانس‌های بالاتر کمتر است. به این ترتیب آنتن پیشنهادی علاوه بر عملکرد بسیار مناسب در فضای آزاد و نیز کاملاً با ثبات بر روی بدن، عملکردی کاملاً ایمن را به دست داده است و لذا به خوبی می‌تواند در کاربردهای بر بدن نیز مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۶- توزیع توان جذب شده در نمونه بافت قفسه سینه در فرکانس‌های: (الف) ۲/۴۵، (ب) ۵/۸ گیگاهرتز.

Fig. 16. Distribution of absorbed power in the chest tissue sample at frequencies: (a) 2.45, (b) 5.8 GHz.

در جدول ۴ مقایسه‌ای از عملکرد آنتن پیشنهادی با برخی پژوهش‌های پیشین ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ابعاد آنتن پیشنهادی بسیار کوچک‌تر و کم حجم‌تر از ساختارهای ارائه شده جهت کاربردهای پوشیدنی پیشین بوده و در عین حال عملکرد بسیار مناسبی را نیز از لحاظ پهنای باند، راندمان و بهره ارائه می‌کند. به این ترتیب آنتن پیشنهادی نامزد بسیار مناسبی برای ارتباطات بر بدن و خارج از بدن در حوزه WBAN است.

## ارزیابی میزان SAR

در ارتباطات بر بدن ایمن بودن دستگاه یا آنتن مورد نظر برای کاربر امری بسیار ضروری است. لذا در این بخش سطح SAR برای آنتن پیشنهادی مطابق با استاندارد ICNIRP برای مدل بافت قفسه سینه که در بخش پیشین توضیح داده شد، محاسبه شده است. همانطور که مشخص است آنتن پیشنهادی دارای یک الگوی تشعشعی همه جهته است و لذا استفاده از آن در فواصل بسیار نزدیک به بدن می‌تواند خطر آفرین باشد. اما طبق مطالعات، استفاده از آن در فاصله ۱۵ میلیمتری بی‌خطر است. در این مطالعه میزان SAR برای فاصله ۱۵ میلیمتری از نمونه بافت قفسه سینه، با توان‌های ورودی مختلف با استفاده از استاندارد IEEE C95.3 فراهم و در نرم‌افزار CST محاسبه و نتایج حاصله در جدول ۳ به صورت خلاصه گزارش شده است.

جدول ۳- محاسبه سطح SAR برای آنتن پیشنهادی برای توان‌های ورودی مختلف.

Table 3. Calculation of the SAR level for the proposed antenna for different input powers

input power	2.45 GHz		5.8 GHz	
	100 mW	500 mW	100 mW	500 mW
SAR	1.38	6.88	0.222	1.11

همانگونه که از این جدول مشخص است برای فاصله ۱۵ میلیمتری از مدل بافت بدن، میزان SAR در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز برای توان‌های ورودی مختلف بسیار کوچک‌تر از حد استاندارد ICNIRP بوده است. همچنین مطابق با مطالعات برای فرکانس‌های باند پایین‌تر اگر توان ورودی بیش از ۱۳۵ میلی‌وات نباشد، عملکرد کاملاً ایمنی به دست خواهد آمد. شکل ۱۶ توزیع توان جذب شده توسط بافت را در فرکانس‌های

جدول ۴- مقایسه آنتن پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین مرتبط.

Table 4. Comparison of the proposed antenna with previous related researches.

Reference	Dimensions [mm <sup>3</sup> ]	Operating frequency [GHz]	Relative bandwidth [%]	Efficiency [%]
[32]	64.6×53.7×3.94	5.8/2.4	5.1/4.9	85.6/72.8
[25]	50×74.69×4	5.3/2.45	-	-
[16]	60×60×2	5.8/2.4	49.11/46	-
[23]	40×40×1.6	5.4/2.45	41.48/29.79	-
[30]	88×95×10.2	2.4/0.402	4.16/0.99	-
[26]	70×70×2	3.5/2.38	7/4.1	59.2/63.3
This paper	16×26×0.8	5.8/2.4	69.13/4.89	88.42/88.1

## نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن پوشیدنی کوچک و کم حجم با ابعاد کلی  $16 \times 26 \times 0.8$  میلیمتر مکعب و عملکردی دو بانده برپایه زیرلایه راجرز RO4003 پیشنهاد شده است. علت انتخاب این زیرلایه صرفاً قیمت ارزان و در دسترس بودن آن است. آنتن پیشنهادی جهت عملکرد در دو باند فرکانسی  $2/4$  و  $5/8$  گیگاهرتز ISM طراحی شده و پهنای باند نسبی آنتن در باندهای فرکانسی  $2/4$  و  $5/8$  گیگاهرتز به ترتیب  $4/89\%$  و  $69/13\%$  درصد به دست آمده است. همچنین این آنتن یک الگوی تشعشعی همه جهته را در سرتاسر هر دو باند فرکانسی نشان می دهد. راندمان کل آنتن در فرکانس های  $2/45$  و  $5/8$  گیگاهرتز بیش از  $88\%$  و بهره آنتن در فرکانس های  $2/45$  و  $5/8$  گیگاهرتز به ترتیب  $2/76$  dB و  $1/23$  dB به دست آمده است. میزان بیشینه بهره به دست آمده در باندهای عملکردی  $4/3$  dB است. به علاوه عملکرد آنتن در نزدیکی مدل فانتوم بافت قفسه سینه مورد بررسی قرار گرفته و میزان SAR برای آنتن پیشنهادی در هر دو فرکانس  $2/45$  و  $5/8$  گیگاهرتز بسیار کوچک تر از حد استاندارد ICNIRP به دست آمده است. با توجه به عملکرد بسیار مناسب آنتن پیشنهادی، و نیز کوچک بودن ابعاد کلی آن، می تواند نامزد بسیار مناسبی برای کاربردهای WBAN باشد.

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## منابع

- Conference, Loughborough, UK, 2008, pp. 132-136, <https://doi.org/10.1109/LAPC.2008.4516940>.
- [6] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "An overview of electromagnetic band-gap integrated wearable Antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 7641-7658, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2963997>.
- [7] *IEEE Standards for Safety Levels with Request to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 KHz to 300ghz*. IEEE C95.1-1991(Revision of ANSI C95.1-1982), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1992.
- [8] *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)*, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Health Physics, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [9] A. Smida, A. Iqbal, A. J. Alazemi, M. I. Waly, R. Ghayoula, and S. Kim "Wideband wearable antenna for biomedical telemetry applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15687-15694, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967413>.
- [10] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "Inverted e-shaped wearable textile antenna for medical applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35214-35222, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2847280>.
- [11] R. Jothi Chitra, V. Nagarajan, and D. Mukesh, "Design of wearable pentagonal fractal antenna for soldier location tracking," in *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCCSP)*, Chennai, India, 2020, pp. 110-113, <https://doi.org/10.1109/ICCCSP48568.2020.9182179>.
- [12] A. Arif, M. Zubiar, M. Ali, M. U. Khan, and M. Q. Mehmood, "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, 2019, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906829>.
- [13] M. E. Gharbi, M. Martinez-Estrada, Raul Frenandez-Garcia, S. Ahyoud, and I. Gill "A novel ultra-wide band wearable antenna under different bending conditions for electronic-textile applications," *The Journal of the Textile Institute*, vol. 112, no. 3, pp. 437-443, 2020, <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1762326>.
- [14] A. ALI, S. N. Azemi, M. Jusoh, and T. Sabapathy, "Defected ground plane of wearable circular patch antenna," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 767, 1st International Symposium on Engineering and Technology (ISETech)*, Perlis, Malaysia, 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/767/1/012003>.
- [15] A. Ennajih, B. Nasiri, J. Zbitou, A. Errkik, and M. Latrach, "A wearable UHF RFID tag antenna-based metamaterial for biomedical applications," *Bulletin of Electrical Engineering and*
- [1] N. H. M. Rais, P. J. Soh, F. Malek, S. Ahmad, N. B. M. Hashim and P. S. Hall "A review of wearable antenna," in *Loughborough Antennas & Propagation Conference*, Loughborough, UK, 2009, pp. 225-228, <https://doi.org/10.1109/LAPC.2009.5352373>.
- [2] A. Tsohis, "Wearable antennas: design, connectivity, and evaluation measurement techniques," Ph.D. dissertation, Loughborough University Institutional Repository, UK, 2016.
- [3] R. Negra, I. Jemili, and A. Belghith, "Wireless body area networks: Applications and technologies," *Procedia Computer Science*, vol. 83, pp. 1274-1281, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.266>.
- [4] S. Zhu and R. Langley, "Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 926-935, 2009, <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2014527>.
- [5] J. C. G. Matthew, B. Pirollo, A. Tyler, and G. Pettitt, "Body wearable antennas for UHF/VHF", in *Loughborough Antennas and Propagation*

- Letters*, vol. 58, no. 8, pp. 1934-1937, 2016, <https://doi.org/10.1002/mop.29937>.
- [25] P. Rahmatian, M. Movahedi, and A. Ghafoorzadeh-Yazdi, "Dual-band dual-mode wearable antenna for on-off body communication based on metamaterial," in *26th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Mashhad, Iran, 2018, pp. 649-653, (in Persian) <https://doi.org/10.1109/ICEE.2018.8472524>.
- [26] H. Yang and X. Liu, "Wearable dual-band and dual-polarized textile antenna for on-and off-body communications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2324–2328, 2020, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3032540>.
- [27] 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, 2017, Art. no. 349, <https://doi.org/10.3390/s17020349>.
- [28] 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, 2014, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2334362>.
- [29] 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 *International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, Noida, India, 2015, pp. 34-39, <https://doi.org/10.1109/ICSPCom.2015.7150629>.
- [30] A. Bouazizi, G. Zaibi, A. Iqbal, A. Basir, M. Samet, and A. Kochouri, "A dual-band case-printed planar inverted-F antenna design with independent resonance control for wearable short-range telemetric systems," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 8, 2019, Art. no. e.21781, <https://doi.org/10.1002/mmce.21781>.
- [31] A. Afridi, S. Ullah, S. Khan, A. Ahmed, A. H. Khalil, and M. Ahmad Tarar, "Design of dual band wearable antenna using metamaterials," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 47, no. 2, pp. 126-137, 2013, <https://doi.org/10.1080/08327823.2013.11689852>.
- [32] S. Agneessens and H. Rogier, "Compact half diamond dual-band textile HMSIW on-body antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 5, pp. 2374-2381, 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2308526>.
- Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 676-684, 2020, <https://doi.org/10.11591/eei.v9i2.1661>.
- [16] S. Roy and U. Chakraborty, "Metamaterial based dual wideband wearable antenna for wireless applications," *Wireless Personal Communications*, vol. 106, pp. 1117–1133, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06206-3>.
- [17] A. Sharifi and J. Khalilpour, "Patch antenna gain enhancement with meta-material split ring resonator radome," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 3, no. 3, pp. 39-43, 2015, (in Persian).
- [18] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Low-profile dual-band textile antenna with artificial magnetic conductor plane," *IEEE Transactions Antennas Propagation*, vol. 62, no. 12, pp. 6487-6490, 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2359194>.
- [19] H. Babaei, S. A. Gohari, and P. Mohamadi, "Design, simulation, fabrication and determining the equivalent circuit model of a reconfigurable RFSS unit cell filter for electromagnetic protection of space payload systems," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 71-82, 2023, (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1448>.
- [20] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "Highly efficient wearable CPW antenna enabled by EBG-FSS structure for medical body area network applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77529-77541, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883379>.
- [21] G. P. Gao, B. Hu, S. Wang, and C. Yang, "Wearable circular ring slot antenna with EBG structure for wireless body area network," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 17, no.3, pp. 434-437, 2018, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2794061>.
- [22] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "Robust and efficient integrated antenna with EBG-DGS enabled wide bandwidth for wearable medical device applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56346-56358, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981867>.
- [23] O. A. Saraereh, "Microstrip wearable dual-band antenna design for on body wireless communications," in *4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Singapore, 2019, pp. 585-589, <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2019.8821765>.
- [24] M. G. Huang, Z. M. Xie, and X. Z. Lai, "A compact multiband PIFA for handheld RFID applications," *Microwave and Optical Technology*