

Vol. 13/ No. 49/Autumn 2023

Review Article

# An Overview of Printed Microstrip Antennas in Eyewear Applications

Mahdi Jalali, Assistant Professor<sup>1,2\*</sup> 

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Naghadeh Branch, Islamic Azad University, Naghadeh, Iran.

<sup>2</sup> Microwave and Antenna Research Center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran  
[Mahdi.jalali@iau.ac.ir](mailto:Mahdi.jalali@iau.ac.ir)

Correspondence

**Mahdi Jalali**, Assistant Professor of Electrical Engineering, Naghadeh Branch, Islamic Azad University, Naghadeh, Iran.  
Microwave and Antenna Research Center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran  
[Mahdi.jalali@iau.ac.ir](mailto:Mahdi.jalali@iau.ac.ir)

**Received:** 24 November 2022

**Revised:** 27 December 2022

**Accepted:** 10 January 2023

## Abstract

This article reviews some of the smart antennas used in Eyewear, which can receive frequencies of 700-960 MHz and 2.7-1.7 GHz, as well as Wi-Fi 5G (5.18-5.85 GHz) and Wi-Fi 6e (5.925 -7.125 GHz) to be used in wireless Eyewear glasses. Since the antennas of Eyewear devices that work in 4G, 5G cellular communication standard and Wi-Fi 6 internal wireless communication is a new category, first a general study for antenna bandwidth in different locations is done. Given that, these antennas are designed as mutual elements (coupled) and are mostly placed on FR4 or polycarbonate substrate. Then the MIMO antennas used in these glasses are investigated and gain, efficiency and SAR studies are performed along with different modes. In order to obtain a good adaptation to the use cases, the human head is always considered in the simulations. After that, antenna designs with suitable dielectric cover and frame are suggested.

**Keywords:** Smart Glasses, Eyewear, MIMO, SAR, Coupling.

## Highlights

- Introduction and review of antennas used in smart glasses (Eyewear).
- Report on specific absorption rate (SAR) measurements.
- Feasibility of location and necessary bandwidth in frequencies of 700-960 MHz and 2.7-1.7 GHz, as well as Wi-Fi 5G (5.18-5.85 GHz) and Wi-Fi 6e (5.925-7.125 GHz) for Eyewear antennas.
- Report measurements of antenna gain, antenna efficiency, and radiation pattern of MIMO antennas used in smart glasses.

**Citation:** M. Jalali, "An Overview of Printed Microstrip Antennas in Eyewear Applications," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 49, pp. 81–104, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1973526.1178, (in Persian).

## مقاله پژوهشی

## مروری بر آنتن‌های ریزنواری چاپی در کاربرد عینک‌های هوشمند

مهدی جلالی\* ۲۰۱ ID

## چکیده:

این مقاله به مرور برخی از آنتن‌های ریزنواری چاپی مورد استفاده در عینک‌های هوشمند می‌پردازد که می‌توانند فرکانس‌های ۷۰۰-۹۶۰ مگاهرتز و ۲/۷-۱/۷ گیگاهرتز و نیز وای‌فای نسل پنجم (۵/۸۵-۵/۱۸ گیگاهرتز) و وای‌فای نسل ششم توسعه داده‌شده (۷/۱۲۵-۵/۹۲۵ گیگاهرتز) را پوشش دهند تا در عینک‌های متصل بی‌سیم استفاده شوند. از آنجایی که آنتن‌های دستگاه‌های عینک هوشمند که در استاندارد ارتباطات سلولی نسل‌های پنجم و ششم و ارتباطات داخلی بی‌سیم وای-فای نسل ششم کار می‌کنند، موضوع جدیدی است، ابتدا مطالعه کلی برای پهنای باند آنتن در محل‌های قرارگیری مختلف انجام می‌شود. این آنتن‌ها به صورت عنصرهای متقابل (تزوئجی) طراحی می‌شوند و اکثراً بر روی زیر لایه FR4 و یا پلی‌کربنات قرار می‌گیرند. سپس به آنتن‌های چند ورودی-چند خروجی مورد استفاده در این عینک‌ها موجود در مراجع پرداخته می‌شود و بهره، راندمان و مطالعات آهنگ جذب ویژه به همراه حالت‌های مختلف انجام می‌شود. برای به دست آوردن انطباق خوب با موارد استفاده عملی، سر انسان همیشه در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، مزایا و معایب آنتن‌های مورد استفاده در این عینک‌ها در مراجع مختلف با هم مقایسه می‌شود.

کلید واژه‌ها: آنتن، عینک هوشمند، سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی، نرخ جذب ویژه، تزوئج.

<sup>۱</sup> گروه برق، واحد نقده، دانشگاه آزاد اسلامی، نقده، ایران، mahdi.jalali@iau.ac.ir

<sup>۲</sup> مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران mahdi.jalali@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

\*مهدی جلالی، استادیار، گروه برق، واحد نقده، دانشگاه آزاد اسلامی، نقده، ایران، مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران mahdi.jalali@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳ آذر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۶ دی ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۰ دی ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1973526.1178>

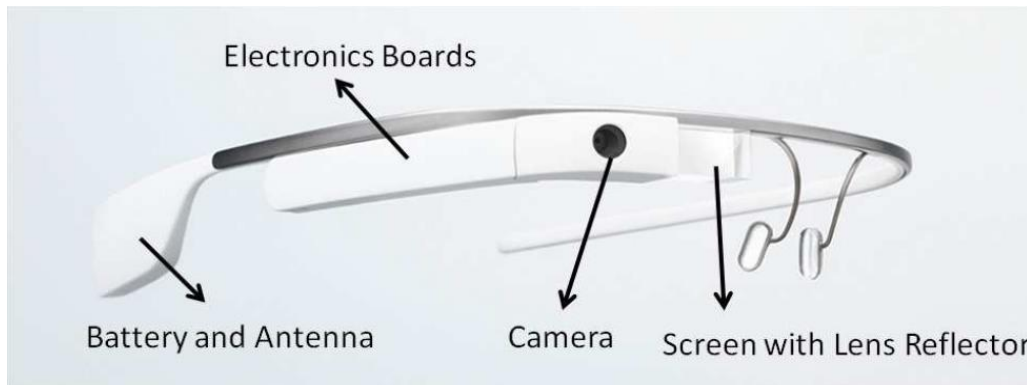
## ۱-مقدمه

دستگاه‌های پوشیدنی که دارای اتصال بی‌سیم با لوازم جانبی هستند در سال‌های گذشته محبوبیت قابل توجهی به دست آورده‌اند. از جمله نمونه‌هایی از این دستگاه‌ها، می‌توان به صفحه‌کلید و ماوس بی‌سیم، دوربین، کلیدهای USB<sup>۱</sup> و ... اشاره کرد [۱]. در سال‌های اخیر لوازم جانبی پوشیدنی مانند ساعت، انگشتر و عینک نیز به‌عنوان وسایل ارتباطی اهمیت پیدا کرده‌اند. یکی از محبوب‌ترین این دستگاه‌ها عینک هوشمند<sup>۲</sup> است که در حال حاضر دارای اتصال وای‌فای یا بلوتوث با تلفن همراه جانبی است [۲]. در حال حاضر بسیاری از پروژه‌های در حال انجام توسط شرکت‌های مختلف وجود دارد که عرضه این دستگاه‌های "عینک هوشمند" را در سال‌های اخیر مانند [۳-۵] هدف قرار می‌دهند. نمونه‌ای از چنین دستگاهی را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد [۶]. این دستگاه دارای ساختار مکانیکی است که می‌تواند با هر قاب شیشه‌ای به‌خصوص اگر نوری یا خورشیدی باشد یکپارچه شود. باتری به همراه آنتن وای‌فای و بلوتوث پشت گوش کاربر قرار می‌گیرد. در کنار سر، بردی یافت می‌شود که لوازم الکترونیکی مانند صفحه‌نمایش لمسی و پردازنده‌های ویدیویی/صوتی را در خود جای داده است.

<sup>۱</sup> Universal Serial Bus

<sup>۲</sup> Eyewear

اتصال گیرنده و آنتن با استفاده از کابل RF<sup>۱</sup> که از فریم پلاستیکی عینک عبور می‌کند انجام می‌شود. یک دوربین در ناحیه مربوط به جلوی سر قرار می‌گیرد. مشکل نمایشگر با استفاده از عدسی منشوری در جلوی چشم، بدون هیچ‌گونه اختلالی در بینایی واقعی چشم حل می‌شود [۷].



شکل ۱: نمونه‌ای از یک عینک هوشمند [۱]

Figure 1. An example of a Eyewear [1]

در حال حاضر انواع مختلفی از آنتن‌ها در دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند و گوشی‌های هوشمند وجود دارد. این دستگاه‌ها معمولاً نیاز به عملکرد باند فوق وسیع<sup>۲</sup> دارند [۸]. به دلیل فضای محدود طراحی آنتن، آنتن‌های شیاری<sup>۳</sup> یا آنتن‌های میکرواستریپ بهترین انتخاب برای این محیط‌های کاری هستند [۹-۱۰]. طراحی آنتن این دستگاه‌ها نسبتاً آسان است زیرا فضای آنتن با طول موج در این فرکانس قابل مقایسه است [۱۱]. همچنین از آنجایی که سطوح توان برای بلوتوث بسیار کوچک است (معمولاً ۲/۵ میلی‌وات)، همچنین ملاحظات آهنگ جذب ویژه<sup>۴</sup> نگران‌کننده نیست و هیچ مقرراتی وجود ندارد [۱۲-۱۴] اما به‌طور گسترده پیش‌بینی می‌شود که این دستگاه‌ها ممکن است در سال‌های آینده جایگزین تلفن‌های همراه شوند؛ بنابراین، به‌وضوح نیاز به آنتن‌های سلولی نسل‌های چهار و پنج برای این دستگاه‌های عینک هوشمند، با عملکرد رضایت‌بخش و انطباق با الزامات آهنگ جذب ویژه در بخش سر کاربر وجود دارد.

در شبکه‌های تلفن همراه نسل چهارم<sup>۵</sup>، سیستم‌های آنتن ۲×۲ چند ورودی- چند خروجی<sup>۶</sup> به‌طور گسترده در محصولات مختلف ارتباط بی‌سیم استفاده شده است [۱۵]. با این حال، برای ارتباطات سیار نسل پنجم<sup>۷</sup> و ارتباطات داخلی بی‌سیم وای‌فای نسل شش، آنتن‌های بیشتری برای پشتیبانی از آهنگ انتقال پهنای باند وسیع در باند فرکانس فوق‌العاده بالا و قابلیت اطمینان مسیر انتقال بهتر مورد نیاز است [۱۶-۱۷]. علاوه بر این، راه‌اندازی یک سیستم آنتن چند ورودی- چند خروجی با ایزولاسیون بالا در دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند با محدودیت فضا، چالش بزرگی برای محققان آنتن خواهد بود و یک معماری آنتن نامتقارن می‌تواند مشکل ایزولاسیون ضعیف را جبران کند [۱۸]. آنتن عینک‌های هوشمند اغلب بر روی شقیقه‌ها (پایه‌ها) قرار می‌گیرد. هنگامی که آنتن به بدن انسان نزدیک‌تر است، آهنگ جذب ویژه کمتری برای مطابقت با مقررات کشورهای مختلف مورد نیاز است [۱۹-۲۱]. مقدار آهنگ جذب ویژه تحت استاندارد ایجاد شده توسط کمیسیون ارتباطات فدرال در ایالات متحده برای یک گرم از بافت سر ۱/۶ وات بر کیلوگرم محدود شده است [۲۲]، در حالی که اروپا و موسسه مهندسی برق و الکترونیک نیاز دارند که مقدار آهنگ جذب ویژه برای ده گرم از بافت سر، ۲ وات بر کیلوگرم محدود شود [۲۳]. از آنجایی که فرکانس کاری وای‌فای نسل ششم توسعه داده شده بیشتر از ۶ گیگاهرتز است، کمیسیون ارتباطات فدرال نیاز به اندازه‌گیری چگالی توان<sup>۸</sup> دارد و مقدار حد آن ۱۰ وات بر مترمربع است [۲۴]. در دهه‌های اخیر، آنتن‌های

<sup>1</sup> Radio Frequency

<sup>2</sup> Ultra Wide Band

<sup>3</sup> Slot

<sup>4</sup> Specific absorption rate

<sup>5</sup> 4 Generation

<sup>6</sup> Multi Input Multi Output

<sup>7</sup> 5 Generation

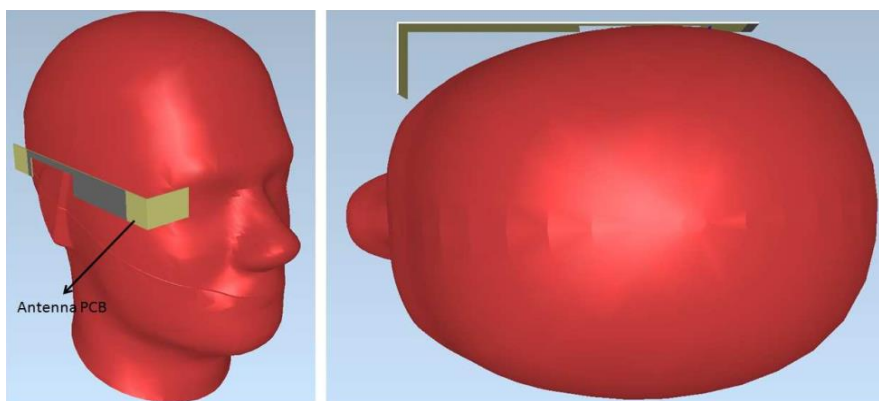
<sup>8</sup> Power density

پوشیدنی، توجه زیادی را به خود جلب کرده و به سرعت در حال توسعه هستند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم بدنی<sup>۱</sup> به طور گسترده نقش خود را در نظارت پزشکی، مراقبت از کودکان و سالمندان، نجات، پشتیبانی از میدان جنگ، اکتشاف و غیره ایفا می‌کنند [۲۵].

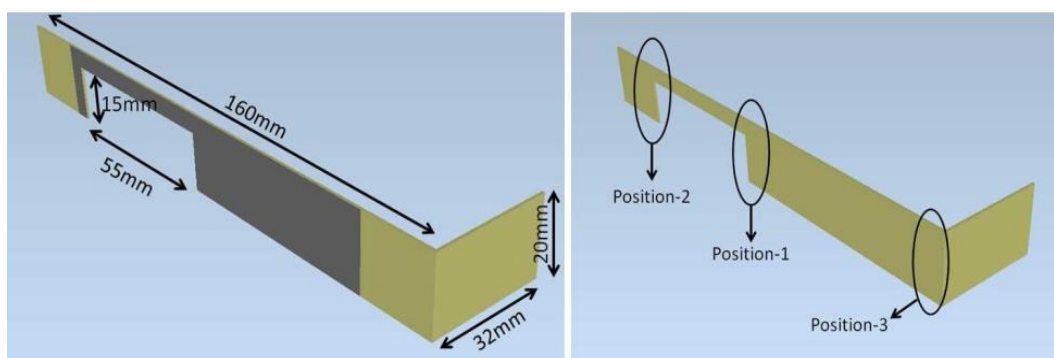
در این مقاله بعد از مطالعه امکان‌سنجی برای آنتن‌های عینک هوشمند و بررسی راه‌حل‌های آنتن عینک هوشمند برای پوشش ارتباطات بی‌سیم نسل‌های چهارم و پنجم به فرآیند طراحی و شبیه‌سازی چند نمونه آنتن عینک پرداخته شده و تطابق مدارها بررسی می‌شود. بخش بعدی تأثیر ناشی از نزدیک شدن آنتن به سر و شبیه‌سازی مقدار آهنگ جذب ویژه سر را ارائه می‌کند. در بخش ۳، یک آنتن عینک هوشمند در ارتباطات بی‌سیم نسل پنجم و وای‌فای نسل ششم توسعه داده شده توصیف می‌شود و اندازه‌گیری‌هایی از بهره آنتن، بازده و الگوی تشعشعی دوبعدی در بخش ۴ ارائه می‌شود. در نهایت، این مقاله در بخش ۵ آنتن‌های مختلف را مقایسه و نتیجه‌گیری می‌کند.

## ۲- مطالعه امکان‌سنجی برای آنتن‌های عینک هوشمند

به‌عنوان یک مثال کاربردی از آنتن‌های عنصرهای متقابل<sup>۲</sup> در دستگاه‌های عینک هوشمند، ابتدا یک مطالعه امکان‌سنجی (شبیه‌سازی) با در نظر گرفتن سر کاربر انجام می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها، عنصرهای متقابل که کاملاً بر روی زیر لایه FR4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر چاپ شده‌اند در سه مکان آنتن مختلف (که در دسترس هستند) استفاده شده‌اند و پتانسیل‌های پهنای باند و مقادیر آهنگ جذب ویژه در این سه مکان با استفاده از نرم‌افزار تجاری اکسل ایمپایر<sup>۳</sup> مقایسه شدند [۱۰].



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) شبیه‌سازی برای مطالعه امکان‌سنجی (نمای سه بعدی و نمای بالا)، (ب) ابعاد PCB و موقعیت‌های آنتن مورد ارزیابی [۵]  
Figure 2. (a) simulation for feasibility study (3D view and top view), (b) PCB dimensions and antenna positions to be evaluated [5]

<sup>1</sup> Wireless Body Area Network

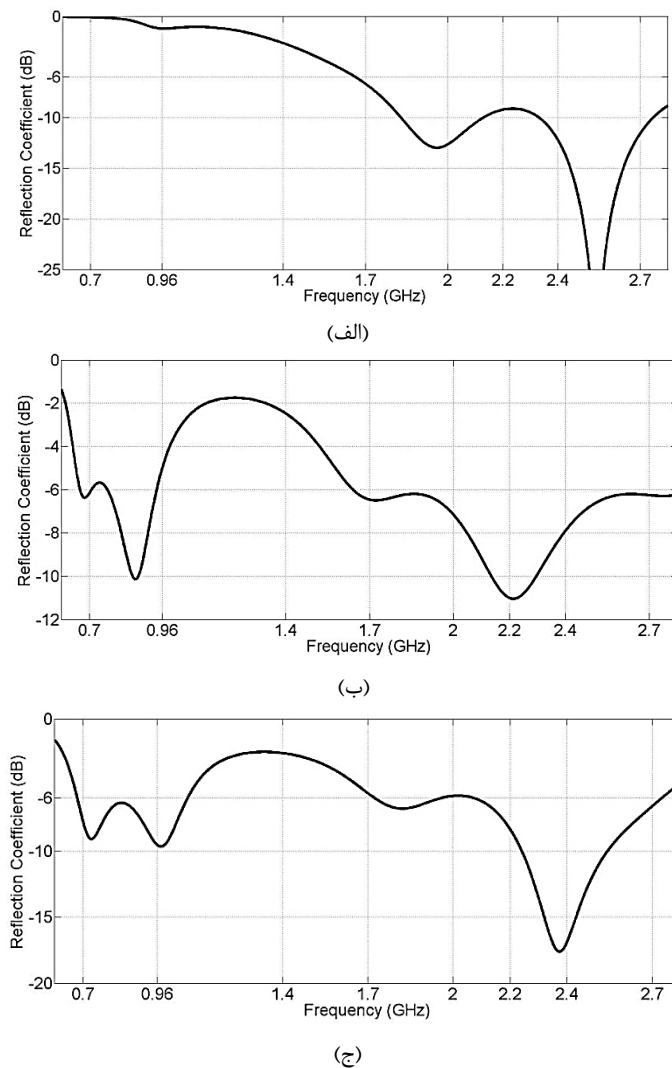
<sup>2</sup> Coupling Element

<sup>3</sup> EMPIRE Xccel

شکل ۲ قسمت الف مدل کلی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. برد مدار چاپی که از آنتن پشتیبانی می‌کند به‌عنوان زیر لایه FR4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و با ابعاد ارائه‌شده در شکل ۲ قسمت ب (به‌عنوان ابعاد واقعی در مقابل سر انسان انتخاب‌شده) مدل شده است. یک خم ۹۰ درجه به برد مدار چاپی اضافه می‌شود تا قسمتی را که جلوی چشم امتداد می‌یابد قرار دهد. عنصرهای متقابل در سمت داخلی برد مدار چاپی و صفحه زمین در سمت بیرونی زیر لایه چاپ‌شده است. سه موقعیت مختلف آنتن از نظر پتانسیل پهنای باند مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مکان‌ها عبارت‌اند از: پشت گوش، جلوی گوش و نزدیک به چشم، همان‌طور که در شکل ۲ قسمت ب نشان داده شده است.

## ۱-۲- بررسی پتانسیل پهنای باند

ضریب بازتاب شبیه‌سازی‌شده با شبکه تطبیق<sup>۱</sup> در سه موقعیت ذکر شده در شکل ۳ ارائه شده است. ضریب بازتاب با استفاده از نرم‌افزار HFSS<sup>۲</sup> با استفاده از دو عنصر در هر نقطه فرکانس محاسبه می‌شود. برای پوشش طیف فرکانس نسل چهارم، پتانسیل پهنای باند تقریباً ۲۶۰ مگاهرتز در ۸۳۰ مگاهرتز و پتانسیل ۱ گیگاهرتز در ۲/۲ گیگاهرتز ضروری است.



شکل ۳: (الف) ضریب بازتاب شبیه‌سازی‌شده در موقعیت ۱ (ب) ضریب بازتاب شبیه‌سازی‌شده در موقعیت ۲ (ج) ضریب بازتاب شبیه‌سازی‌شده در موقعیت ۳ [۵]

Figure3. (a) The simulated reflection coefficient in position 1 (b) The simulated reflection coefficient in position 2 (c) The simulated reflection coefficient in position 3 [5]

<sup>1</sup> Matching Network

<sup>2</sup> High Frequency Structure Simulation

از آنجایی که در اینجا پوشش دو باند ضروری است، پتانسیل پهنای باند در باند بالا<sup>۱</sup> و پتانسیل پهنای باند در باند پایین<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. اگر شکل ۳ قسمت الف مشاهده شود، می توان اشاره کرد که پتانسیل پهنای باند ممکن است با یک شبکه تطبیق ساده برای رسیدن به پوشش دو باند کافی نباشد (۹۶۰-۷۰۰ مگاهرتز و ۲/۷-۱/۷ گیگاهرتز) زیرا پتانسیل در باند پایین و باند بالا به نظر نمی رسد به اندازه کافی بالا باشد. ضریب بازتاب آنتن (با سه عنصر شبکه تطبیق) در موقعیت ۳ (نزدیک به چشم) در شکل ۳ قسمت ج آورده شده است.

## ۲-۲- مقایسه عملکرد آهنگ جذب ویژه در سه مکان

با استفاده از سه عنصر متقابل با شبکه های تطبیق مرتبط در سه مکان مختلف، مقایسه ای در مورد آهنگ جذب ویژه انجام شده است. نتایج شبیه سازی در جدول ۶ خلاصه شده است. نتایج آهنگ جذب ویژه هم برای استاندارد ۱ گرم آهنگ جذب ویژه [۱۱] (حداکثر حد ۱/۶ وات بر کیلوگرم، پذیرفته شده در ایالات متحده) و هم برای استاندارد ۱۰ گرم آهنگ جذب ویژه [۱۲] (حداکثر حد ۲ وات بر کیلوگرم، پذیرفته شده در اروپا) ارائه شده است. نتایج همچنین به صورت نرمال شده به توان برخوردی ۰/۲۵ وات (حداکثر ۲ وات در ۱/۸ ثانیه) و توان تابشی آنتن ۰/۲۵ وات پس از آن (در سطح توان تصادفی برای به دست آوردن ۰/۲۵ وات پس از عدم تطبیق) ارائه شده است. مشاهده می شود به دلیل نزدیکی تغذیه آنتن به سر، نبود صفحه محافظ زمین در زیر آنتن و همچنین عدم وجود یک ماده پوشش دی الکتریک بین آنتن و سر، مقادیر آهنگ جذب ویژه بالاتر از مقادیر آهنگ جذب ویژه است که از اندازه گیری های یک تلفن همراه معمولی به دست می آید. همچنین شایان ذکر است که مقادیر راندمان تشعشعی بیشتر از یک تلفن همراه معمولی است، زیرا برای ترمینال تلفن همراه، آنتن در یک جهت با دست و در جهت دیگر توسط سر پوشانده می شود که باعث افزایش تلفات ناشی از جذب و عدم تطابق می شود. نتیجه دیگری که باید به آن توجه کرد این است که مقدار آهنگ جذب ویژه در موقعیت ۳ در مقایسه با دو مکان دیگر کمتر است، زیرا فاصله عنصر آنتن تا بافت سر بیشتر است. به عنوان جمع بندی، می توان گفت که مقادیر آهنگ جذب ویژه ۱ گرم شبیه سازی شده بالاتر از حد استاندارد هستند، در حالی که مقادیر آهنگ جذب ویژه ۱۰ گرم به طور کلی قابل قبول یا نزدیک به حد (حداکثر حد ۱/۶ وات بر کیلوگرم، پذیرفته شده در ایالات متحده) هستند.

جدول ۱: مقایسه آهنگ جذب ویژه برای موقعیت های مختلف آنتن عینک هوشمند [۵]

Table 1. Comparison of the special absorption song for different positions of the smart glasses antenna [5]

موقعیت	فرکانس (مگاهرتز)	کارایی تشعشع (%)	توان تابشی ۰/۲۵ وات		توان ۰/۲۵ وات بعد از عدم تطبیق	
			آهنگ جذب ویژه ۱ گرم	آهنگ جذب ویژه ۱۰ گرم	آهنگ جذب ویژه ۱ گرم	آهنگ جذب ویژه ۱۰ گرم
۱	۱۹۰۰	۲۵	۷/۸۶	۳/۳۲	۸/۳۷	۳/۵۳
۱	۲۲۰۰	۳۶	۴/۳۱	۲/۰۷	۴/۸۸	۲/۳۵
۱	۲۵۰۰	۴۲	۴/۳۶	۱/۵۴	۴/۳۹	۱/۵۵
۲	۸۳۵	۱۰	۴/۳۳	۲/۰۸	۴/۹۶	۲/۳۹
۲	۱۹۰۰	۲۰	۲/۹۷	۱/۴۷	۳/۸۹	۱/۹۲
۲	۲۲۰۰	۲۱	۴/۱۸	۱/۹۹	۴/۵۴	۲/۱۶
۲	۲۵۰۰	۲۱	۳/۶۸	۱/۸۳	۴/۶۹	۲/۳۳
۳	۸۳۵	۱۳	۴/۱۷	۲/۰۳	۵/۵۰	۲/۶۸
۳	۱۹۰۰	۳۸	۲/۴۷	۱/۱۸	۳/۱۹	۱/۵۳
۳	۲۲۰۰	۳۳	۲/۲۲	۱/۰۴	۲/۶۰	۱/۲۲
۳	۲۵۰۰	۳۷	۱/۹۶	۰/۸۲	۲/۱۱	۰/۸۲
حد			۱/۶	۲	۱/۶	۲

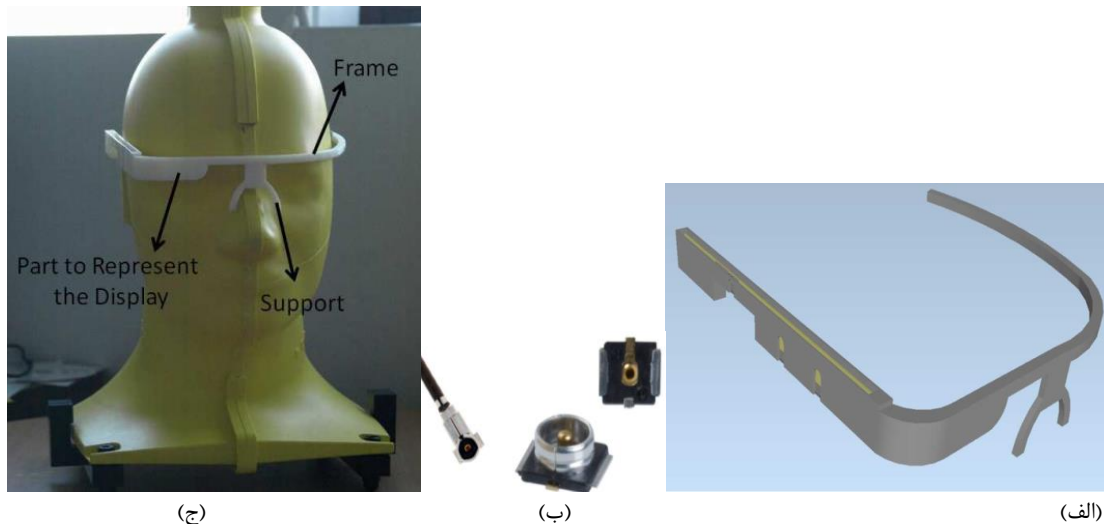
<sup>1</sup> High Band

<sup>2</sup> Low Band

### ۳-۲- راه‌حل‌های آنتن عینک هوشمند برای پوشش نسل ۴

با در نظر گرفتن نتایج مطالعه امکان سنجی، استفاده از عنصر تطبیق چاپ‌شده با شبکه‌های تطبیق امپدانسی برای به دست آوردن پوشش ۷۰۰-۹۶۰ مگاهرتز و ۷/۷-۱/۲ گیگاهرتز برای استاندارد ارتباطات سلولی نسل ۴ تا حد امکان پیش‌بینی شده است. برای این منظور یک آنتن عنصر تطبیق بهینه‌شده در این بخش پیشنهاد شده است که می‌تواند باندهای ۹۶۰ تا ۷۰۰ مگاهرتز و ۱/۷-۲/۷ گیگاهرتز را به‌طور هم‌زمان پوشش دهد.

برای یک سناریوی واقعی‌تر، یک پوشش دی‌الکتریک با گذردهی نسبی ۲/۹۷ و تانژانت تلفات ۰/۰۲۹ مدل شده و در شبیه‌سازی‌ها همان‌طور که در شکل ۴ قسمت الف مشاهده می‌شود استفاده شد. زیر لایه FR4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر در داخل بدنه با استفاده از چند شکاف ثابت می‌شود. یک شکاف هوای ۱ میلی‌متری بین برد مدار چاپی و لبه داخلی بدنه (لبه نزدیک به سر) و یک شکاف هوای ۳ میلی‌متری بین برد مدار چاپی و لبه بیرونی بدنه وجود دارد. ضخامت پوشش دی‌الکتریک ۱ میلی‌متر انتخاب شده است. تحریک آنتن باید با استفاده از یک رابط مخصوص (شکل ۴ قسمت ب، [۱۸]) در سمت بیرونی برد مدار چاپی، جایی که آنتن‌های دارای عنصر متقابل نیز چاپ می‌شوند، انجام شود. وجه دیگر برد مدار چاپی (روی به سمت سر) به‌عنوان صفحه زمین استفاده می‌شود. یک سوراخ روی وجه بیرونی محفظه باقی‌مانده است تا کابل مخصوص را خارج از محفظه قرار دهد. این مدل با استفاده از پرینت سه بعدی با مواد نیمه سفت‌وسخت ساخته شده است. نمونه اولیه تولیدشده را می‌توان در شکل ۴ قسمت ج روی یک فانتوم سر مشاهده کرد.



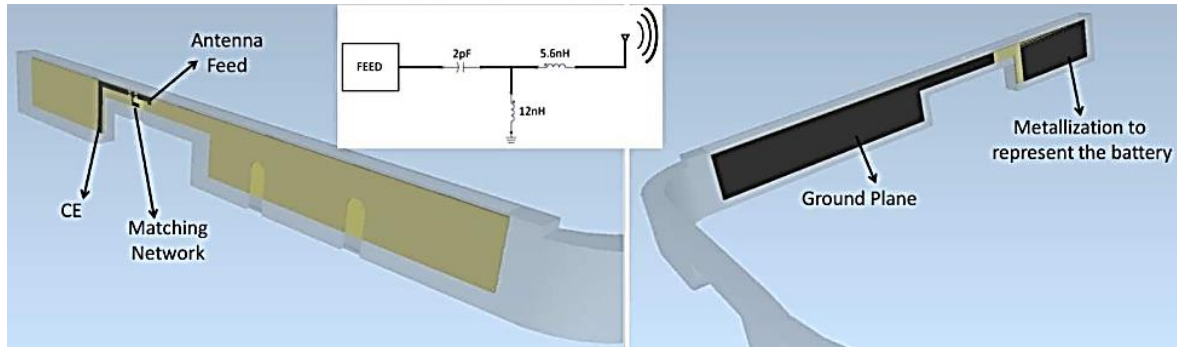
شکل ۴: (الف) مدل فریم عینک هوشمند (ب) کانکتور مخصوص (ج) نمونه اولیه ساخته‌شده [۵]

Figure4. (a) Eyewear frame model (b) special connector (c) built prototype [5]

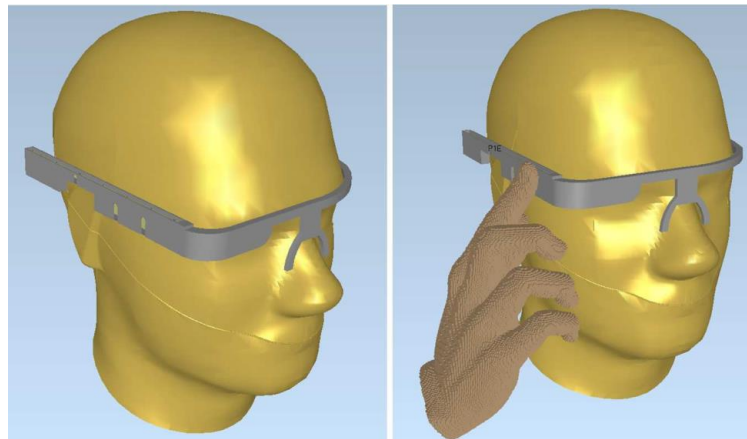
برای موارد استفاده از آنتن‌های عینک هوشمند در عمل، سه حالت مورد ارزیابی قرار گرفته است. اولین حالت، آنتن و قاب عینک هوشمند است که بر روی سر قرار گرفته است که به‌عنوان اصلی‌ترین مورد استفاده از دستگاه پیش‌بینی شده است. آنتن‌ها برای این حالت طراحی و بهینه شدند. دو حالت دیگر نیز در شبیه‌سازی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت که عبارت‌اند از شرایط فضای آزاد و حالت "با سر + دست". شرایط فضای آزاد را می‌توان در حالتی که در آن عینک هوشمند توسط کاربر استفاده نمی‌شود، اما هم‌چنان باید برای امکان تماس ورودی کاربردی باشد. حالت دیگر «با سر+دست» وضعیتی است که کاربر با استفاده از صفحه لمسی کناری با یک یا چند انگشت، تنظیمات یا برنامه‌های دستگاه را تغییر می‌دهد.

### ۴-۲- طراحی آنتن و نتایج

آنتن طراحی شده دارای یک عنصر متقابل است که روی زیر لایه، درست در پشت گوش همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، چاپ شده است. تغذیه عنصر متقابل از لبه انجام می‌شود و یک فاصله از زمین در پایین عنصر متقابل ایجاد می‌شود. یک شبکه تطبیق از ۳ جزء تشدید در تغذیه آنتن معرفی می‌شود. تنظیمات شبیه‌سازی شامل قاب، پوشش، آنتن، دست و سر را می‌توان در سمت چپ شکل ۶ برای پیکربندی "سر" و در سمت راست برای پیکربندی "سر + دست" مشاهده کرد.

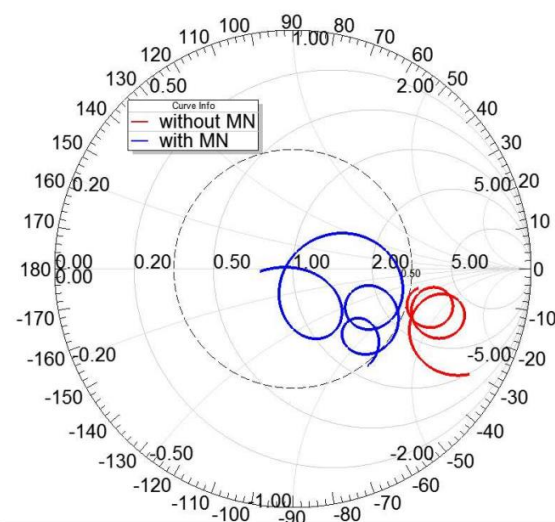


شکل ۵: آنتن عینک هوشمند به همراه شبکه تطبیق [۵]  
Figure5. Eyewear antenna with matching network [5]



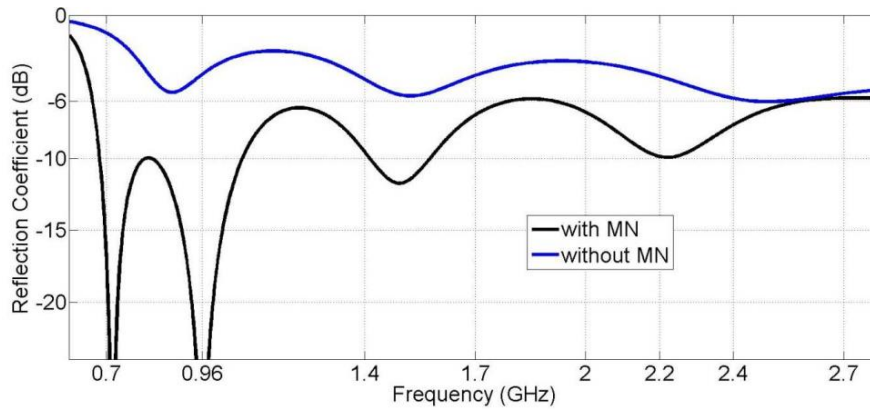
شکل ۶: قرارگیری عینک بر روی سر در دو حالت مختلف بدون دست و با دست [۵]  
Figure6. Placing glasses on the head in two different ways without hands and with hands [5]

امپدانس ورودی شبیه‌سازی شده، با و بدون شبکه تطبیق را می‌توان در شکل ۷ (در پیکربندی سر)، به شکل نمودار اسمیت که بین ۲۷۰۰-۷۰۰ مگاهرتز رسم شده است، مشاهده کرد. ضریب بازتاب مربوطه در شکل ۸ نشان داده شده است. این آنتن دارای ضریب بازتاب زیر ۶- دسیبل بین ۲۷۰۰-۷۰۰ مگاهرتز است که فرکانس کاری موقعیت‌یاب جهانی را علاوه بر باند فرکانس ارتباط سلولی نسل ۴ پوشش می‌دهد.



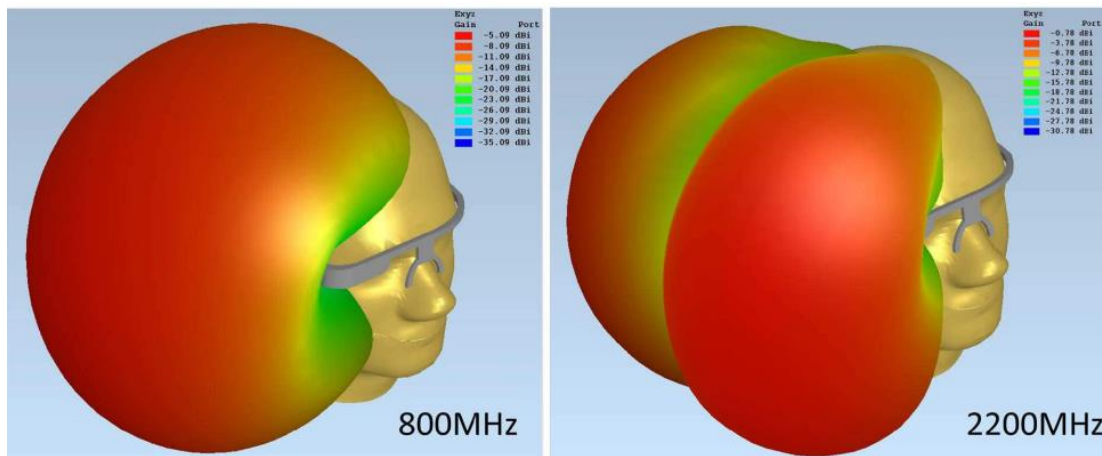
شکل ۷: امپدانس ورودی شبیه‌سازی شده، با و بدون شبکه تطبیق [۵]  
Figure7. Simulated input impedance, with and without matching network [5]





شکل ۸: ضریب بازتاب شبیه‌سازی‌شده، با و بدون شبکه تطبیق [۵]  
Figure8. Simulated reflection coefficient, with and without matching network [5]

شکل ۹ الگوی بهره سه‌بعدی شبیه‌سازی‌شده آنتن را در ۸۰۰ مگاهرتز و ۲۲۰۰ مگاهرتز نشان می‌دهد. تشعشع به دلیل جذب توسط سر همان‌طور که انتظار می‌رود دور از سر متمرکز می‌شود. جدول ۲ مقادیر آهنگ جذب ویژه شبیه‌سازی‌شده را برای سه فرکانس مختلف برای استانداردهای ۱ گرم و ۱۰ گرم خلاصه می‌کند که برای توان تابشی ۰/۲۵ وات نرمالیزه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر آهنگ جذب ویژه در مقایسه با حد استانداردها (۱/۶ وات بر کیلوگرم برای ۱ گرم بافت و ۲ وات بر کیلوگرم برای ۱۰ گرم) بالا هستند. دلیل اصلی، نزدیکی عنصر تشعشعی به بافت در دستگاه عینک هوشمند در مقایسه با یک ترمینال معمولی تلفن همراه است، با توجه به اینکه در تلفن همراه معمولاً در پایین ترمینال قرار می‌گیرند. مقادیر آهنگ جذب ویژه را می‌توان با تنظیم توان خروجی از فرستنده یا با افزایش فاصله آنتن تا سر تا حدی کاهش داد که منجر به ضخیم‌تر شدن قاب عینک می‌شود.



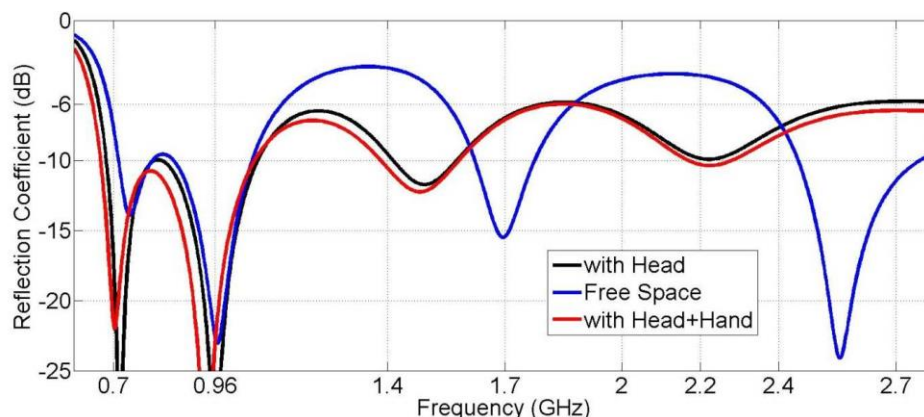
شکل ۹: الگوی بهره سه‌بعدی شبیه‌سازی‌شده آنتن [۵]  
Figure9. Simulated three-dimensional antenna gain pattern [5]

جدول ۲: مقادیر نرخ جذب ویژه برای فرکانس‌های مختلف آنتن عینک هوشمند [۵]  
Table2. Specific absorption rate values for different frequencies of Eyewear antenna [5]

	آهنگ جذب ویژه ۱۰ گرم	آهنگ جذب ویژه ۱ گرم
۹۰۰ مگاهرتز	۲/۹۹	۵/۱۷
۲۱۰۰ مگاهرتز	۴/۹۰	۱۱/۲۸
۲۴۰۰ مگاهرتز	۳/۲۸	۸/۷۵

آنتن همچنین در سه مورد استفاده که قبلاً ذکر شد شبیه‌سازی شد. ضریب بازتاب «با سر»، «فضای آزاد» و «با سر+دست» در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. اثرانگشت نزدیک به محفظه آنتن تأثیر قابل توجهی بر امپدانس آنتن نشان نمی‌دهد و باعث

عدم تطبیق نمی‌شود، زیرا عنصر متقابل از انگشت دورتر است. در فضای آزاد، ضریب انعکاس همچنان در باند پایین کمتر از ۶- دسیبل است، اما در باند بالا بین ۲/۳۵- تا ۱/۸۵ گیگاهرتز از ۶- دسیبل بالاتر می‌رود (تا ۳/۵- دسیبل افزایش می‌یابد).



شکل ۱۰: ضرایب بازگشتی شبیه‌سازی شده آنتن در سه حالت مختلف [۵]

Figure 10. Simulated return coefficients of the antenna in three different modes [5]

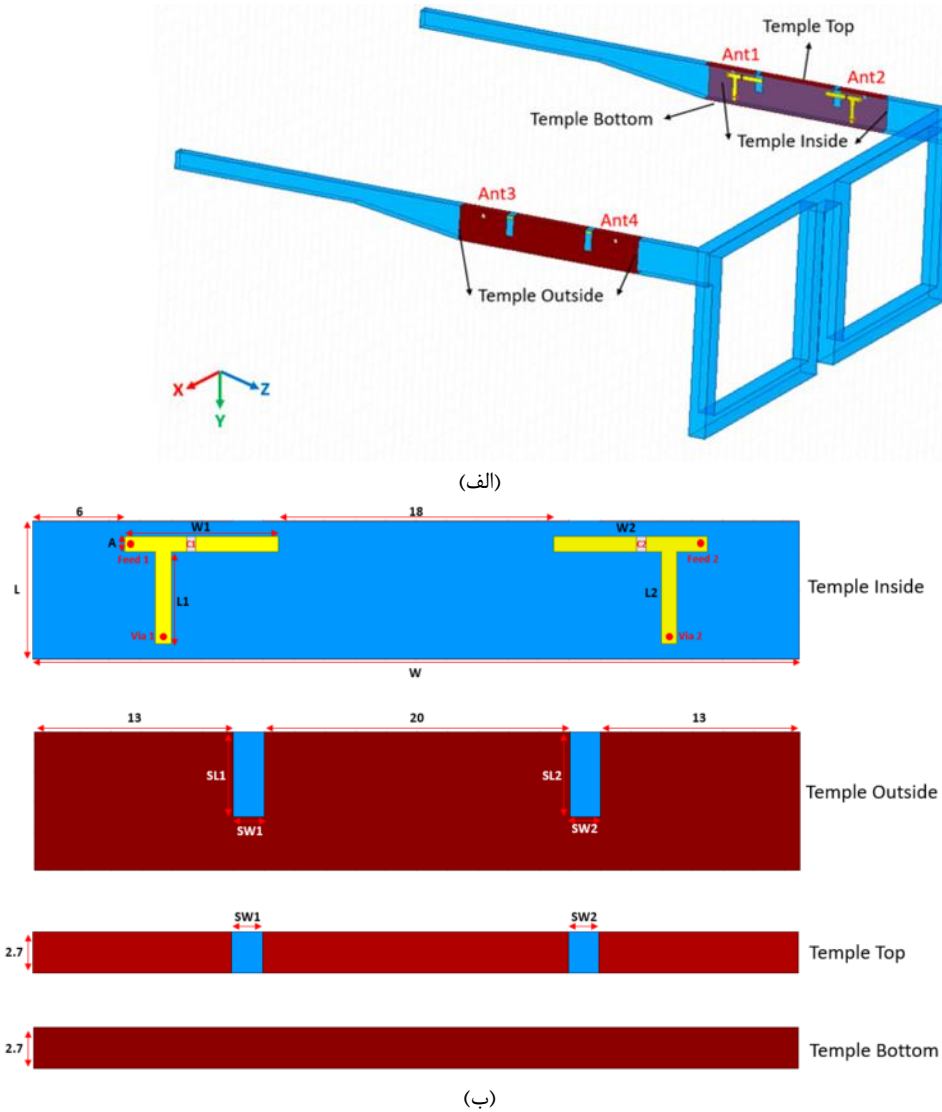
### ۳- سیستم آنتن چند ورودی-چند خروجی $4 \times 4$ برای عینک هوشمند در ارتباطات بی‌سیم وای‌فای نسل ۵ و وای‌فای نسل ۶ توسعه یافته

در ادامه یک سیستم آنتن وای‌فای نسل ۵ (۵/۸۵-۵/۱۸ گیگاهرتز) و وای‌فای نسل ۶ توسعه یافته (۷/۱۲۵-۵/۹۲۵ گیگاهرتز) دو بانده چند ورودی-چند خروجی  $4 \times 4$  را برای شیشه‌های پلاستیکی بررسی می‌شود. در ادامه فرآیند طراحی آنتن عینک تشریح می‌شود. بخش بعدی تأثیر ناشی از نزدیک شدن آنتن به سر و شبیه‌سازی مقدار آهنگ جذب ویژه سر را ارائه می‌کند. در بخش ۴، یک آنتن عینک فیزیکی را بر اساس نتایج شبیه‌سازی قبلی توصیف می‌شود و اندازه‌گیری‌هایی از بهره آنتن، بازده آنتن، و الگوی تشعشعی دوبعدی ارائه می‌گردد. سپس یک جدول مقایسه با مراجع مختلف آورده شده است. در نهایت نتایج ارائه می‌شود.

#### ۳-۱- طراحی آنتن

شکل ۱۱ سیستم آنتن شیاری چند ورودی-چند خروجی  $4 \times 4$  را نشان می‌دهد که در باند وای‌فای نسل ۶ توسعه یافته پیشنهاد شده است. سیستم آنتن را می‌توان به یک آنتن F معکوس و یک صفحه زمین فلزی تقسیم کرد. آنتن معکوس F توسط ساختار لیزری مستقیم<sup>۱</sup> در قسمت داخلی پایه با یک لایه ساخته شده از پلی‌کربنات ساخته شده است. ضخامت زیر لایه ۲/۷ میلی‌متر، ثابت دی‌الکتریک پلی‌کربنات ۲/۸۵ و تانژانت تلفات دی‌الکتریک ۰/۰۰۹۲ است. از شکل ۱۱ قسمت الف مشاهده می‌شود که عینک‌های پیشنهادی در این مقاله به شیشه‌های پلاستیکی رایج در حال حاضر اشاره دارند و اندازه کلی آن ۱۵۵ میلی‌متر  $\times$  ۱۴۵ میلی‌متر  $\times$  ۵۰ میلی‌متر است. پایه سمت چپ به آنتن ۱ و آنتن ۲ و پایه سمت راست مجهز به آنتن ۳ و آنتن ۴ است. آنتن پایه چپ و آنتن پایه راست ساختاری متقارن دارند. شکل ۱ب اندازه دقیق یک آنتن پایه است. برای ابعاد آنتن به جدول ۳ مراجعه شود. آنتن شکافی مساحتی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر  $\times$  ۹ میلی‌متر  $\times$  ۲/۷ میلی‌متر روی پایه را اشغال می‌کند. شکاف از بیرون قسمت بالای پایه امتداد می‌یابد، طول SL ۵/۵ میلی‌متر و عرض SW ۲ میلی‌متر است. آنتن معکوس F از سمت زمین در ۶ میلی‌متر تغذیه می‌کند و یک خازن ۱ پیکوفاراد به صورت سری در وسط آنتن وجود دارد. طول L آنتن ۶ میلی‌متر است و از طریق سوراخ به زمین می‌رسد.

<sup>1</sup> Laser Direct Structuring



شکل ۱۱: (الف) شکل آنتن‌های چند ورودی-چند خروجی  $4 \times 4$  پیشنهادی (ب) ابعاد آنتن شیاری معکوس F با صفحه زمین مسی [۳۱]  
 Figure 11. (a) The shape of the proposed  $4 \times 4$  MIMO antenna (b) the dimensions of the inverted F slot antenna with a copper ground plate [31]

جدول ۳: ابعاد آنتن پیشنهادی [۳۱]

Table 3. Dimensions of the proposed antenna [31]

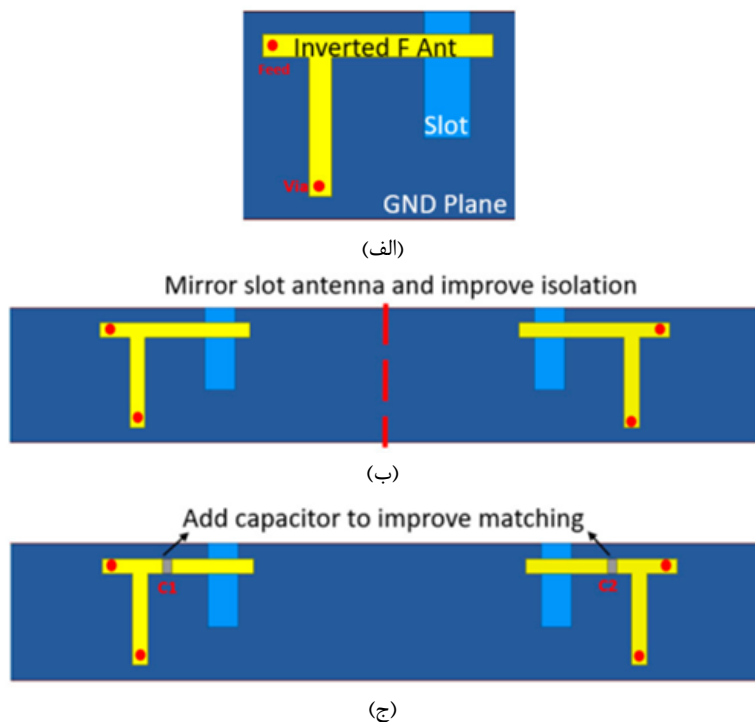
پارامتر	W	L	W1	W2	L1	L2	SL1
واحد(میلی‌متر)	۵۰	۹	۱۰	۱۰	۶	۶	۵/۵
پارامتر	SL2	SW1	SW2	A	خازن	C1	C2
واحد(میلی‌متر)	۵/۵	۲	۲	۱	واحد(پیکوفاراد)	۱	۱

### ۳-۲- شبیه‌سازی و تحلیل آنتن شیاری

مراحل طراحی آنتن ارائه شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۲ قسمت الف، یک آنتن F معکوس که می‌تواند به شکاف متصل شود، نشان داده شده است که از طریق یک سوراخ با قطر ۱ میلی‌متر به زمین متصل می‌شود. صفحه زمین یک لایه مسی فلزی است که دو طرف بیرونی، بالا و پایین شیشه‌ها را می‌پوشاند و با توجه به نتایج شبیه‌سازی، سوراخ‌هایی در سطح بیرونی زمین وجود دارد. همان‌طور که شکل ۱۲ قسمت ب نشان می‌دهد، از آنجایی که ناحیه پایه بزرگ است، دستگاه عینک دارای آنتن متقارن دیگری در فاصله ۱۸ میلی‌متری از آنتن F معکوس است. شکل ۱۲ قسمت ج دو آنتن F معکوس متقارن را با خازن‌های سری نشان می‌دهد که به آنتن اجازه می‌دهد فرکانس تشدید باند فرکانس کاری هدف را تولید کند و

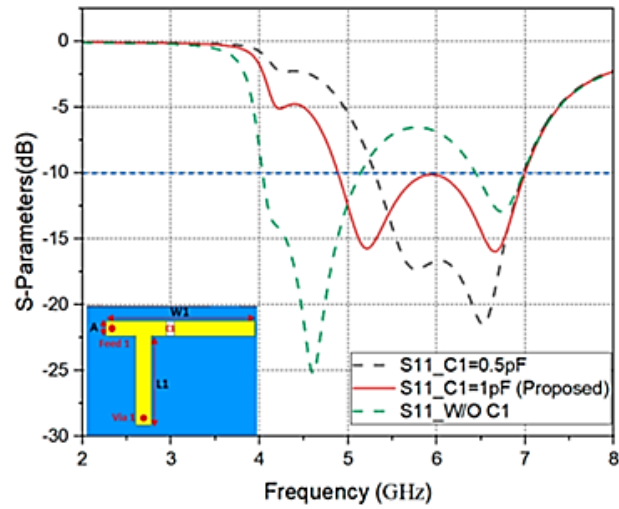
در همان زمان، ایزولاسیون بین دو آنتن را افزایش دهد. ایزولاسیون برای آنتن های چند ورودی-چند خروجی ضروری است. برای شبیه سازی از نرم افزار شبیه سازی HFSS نسخه R1 ۲۰۲۱ استفاده شده است. ابتدا تغییر ظرفیت خازن را شبیه سازی و تحلیل می شود و سپس طول و عرض شیار را شبیه سازی و مقایسه می شود. نتایج شبیه سازی در شکل ۱۳ قسمت الف نشان می دهد که وقتی آنتن مانند شکل ۱۲ قسمت الف است، بدون خازن های سری، فرکانس تشدید توسط کل آنتن شیاری روی ۴/۶ گیگاهرتز و ۶/۷ گیگاهرتز تولید می شود. باین حال، نتایج شبیه سازی نمی تواند باند فرکانسی وای فای ۶ توسعه یافته را به طور کامل پوشش دهد زیرا باند فرکانس کاری کلی نمی تواند پیوسته باشد. بنابراین، سعی می شود آنتن F معکوس را به صورت سری با عناصر خازنی متصل کرده و مقدار خازن را برای تغییر فرکانس رزونانس آنتن شیار تنظیم گردد. وقتی C1 به اندازه ۰.۵ پیکوفاراد باشد، پهنای باند کار نمی تواند وای فای نسل ۵ و ۶ توسعه یافته را پوشش دهد. هنگامی که C1 به اندازه ۱ پیکوفاراد است، نقاط تشدید آنتن شیاری را می توان در فرکانس های ۵/۳ گیگاهرتز و ۶/۶ گیگاهرتز به دست آورد و پهنای باند کار می تواند کل باند وای فای نسل ۵ و ۶ توسعه یافته را پوشش دهد. شکل ۱۳ قسمت ج یک شبیه سازی از وجود یا عدم وجود یک خازن سری را نشان می دهد. مشخص شده است که خازن سری می تواند ایزولاسیون بین دو آنتن را بهبود بخشد و S21 کمتر از -۱۰ دسی بل شود.

در ادامه تغییر اندازه شکاف را نیز شبیه سازی شده است و نتیجه در شکل ۱۴ قسمت الف نشان داده شده است. هنگامی که طول شکاف SL ۴/۵ میلی متر است، با در نظر گرفتن ضریب بازتاب S11 زیر ۱۰- دسی بل، می توان دید که فرکانس تشدید به سمت فرکانس بالا در ۵/۳ گیگاهرتز تا ۶/۶ گیگاهرتز حرکت می کند و شدت تشدید ضعیف خواهد شد. هنگامی که طول شکاف SL ۶/۵ میلی متر باشد، فرکانس رزونانس ۶/۶ گیگاهرتز به سمت فرکانس پایین حرکت می کند و پهنای باند کار نیز کاهش می یابد. شکل ۱۴ قسمت ب نشان می دهد که وقتی عرض شکاف SW عرض شکاف ۱ میلی متر باشد، فرکانس تشدید به فرکانس پایین در ۵/۳ گیگاهرتز حرکت می کند. هنگامی که عرض شکاف ۳ میلی متر است، فرکانس رزونانس ۵/۳ گیگاهرتز به ۶ گیگاهرتز منتقل می شود و باند فرکانسی کلی عملکرد ضعیف می شود. به منظور دستیابی به باند فرکانس کاری مورد انتظار و قدرت رزونانس، طول SL آنتن پیشنهادی ۵/۵ میلی متر و طول SW ۲ میلی متر انتخاب می شود.

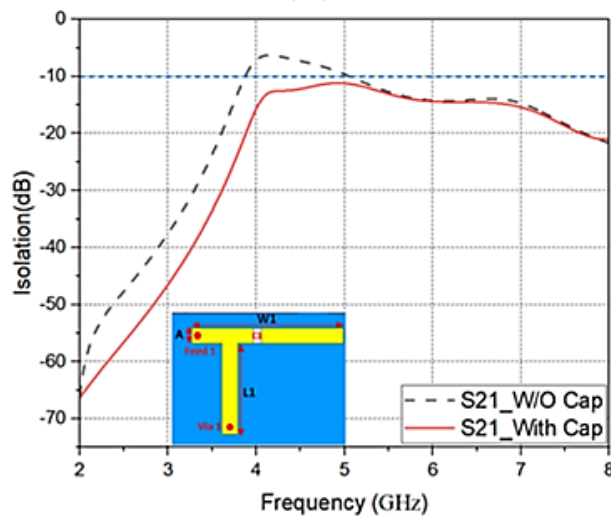


شکل ۱۲: مراحل طراحی آنتن اسلات (الف) سیستم آنتن با یک اسلات تنها (ب) سیستم آنتن با اسلات های آینه ای (ج) خازن سری برای بهبود تطبیق امپدانس

Figure 12. Slot antenna design steps (a) antenna system with a single slot (b) antenna system with mirror slots (c) series capacitor to improve impedance matching

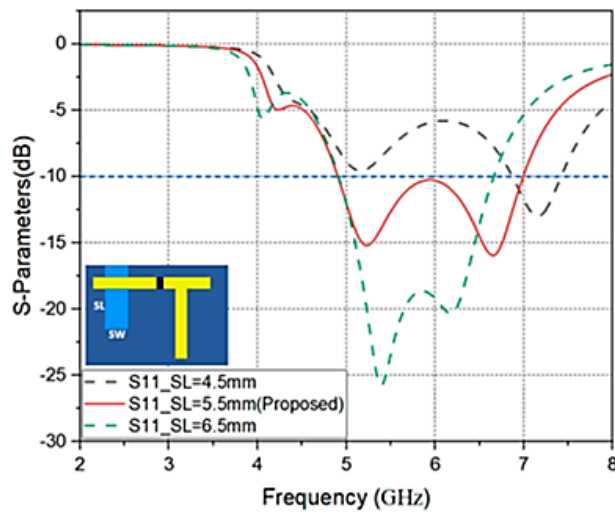


(الف)

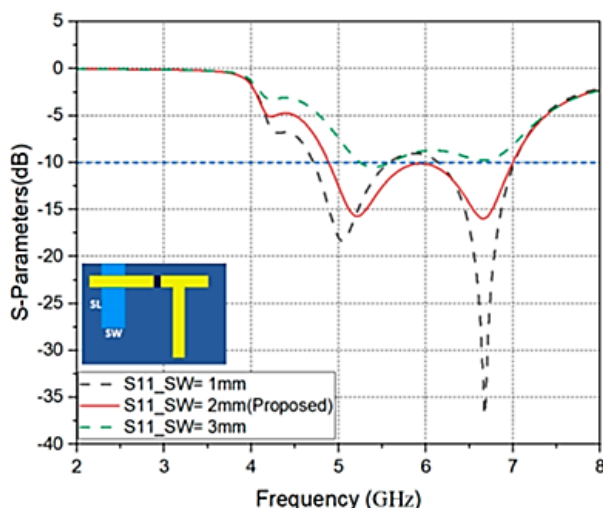


(ب)

شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی پارامتر پراکندگی (الف) تغییرات خازن (ب) تأثیر خازن سری بر روی ایزولاسیون [۳۱]  
 Figure13. The simulation results of the dispersion parameter a) capacitor changes (b) the effect of series capacitor on isolation [31]



(الف)

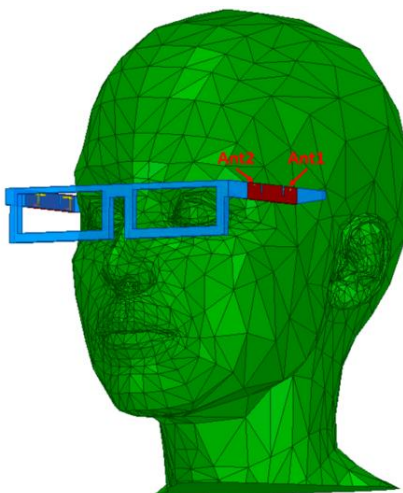


(ب)

شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی پارامتر S (الف) تغییرات شکاف SL (ب) تغییرات شکاف SW [۳۱]  
 Figure14. Simulation results of S parameter (a) SL gap changes (b) SW gap changes [31]

### ۳-۳- شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل آهنگ جذب ویژه

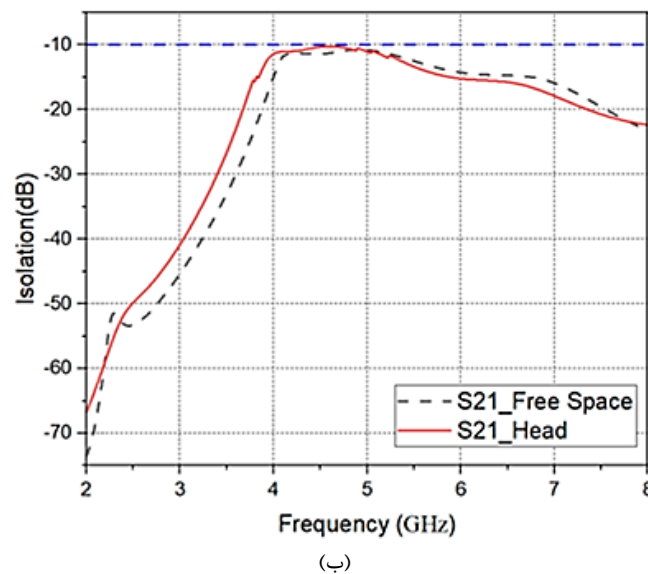
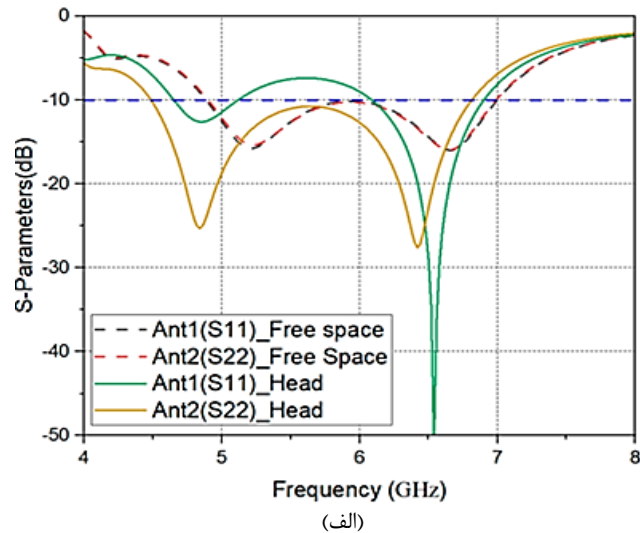
بدن انسان یک ماده پرتلفات برای آنتن است. بنابراین، آنتن پیشنهادی برای شبیه‌سازی باید روی مدل سر انسان قرار گیرد و سپس بررسی گردد که آیا عملکرد آنتن تحت تأثیر قرار می‌گیرد یا خیر. شکل ۱۵ شبیه‌سازی سیستم آنتن عینک وای‌فای نسل ۵ و ۶ توسعه‌یافته را نشان می‌دهد که بر روی مدل سر انسان قرار داده شده است.



شکل ۱۵: مدل قرارگیری آنتن عینک هوشمند پیشنهادی بر روی سر

Figure15. The proposed Eyewear antenna placement model on the head

در مرحله بعد، تغییرات در ضریب بازتاب و ایزولاسیون را زمانی که آنتن پیشنهادی نزدیک به سر است را مورد بحث قرار می‌دهد. از شکل ۱۶ می‌توان دید که آنتن ۱ به سر نزدیک‌تر است و آنتن ۲ دورتر از سر قرار دارد. شکل ۱۶ شبیه‌سازی را با قرار دادن عینک روی سر نشان می‌دهد. آنتن پیشنهادی متقارن است، بنابراین تنها آنتن ۱ و آنتن ۲ شبیه‌سازی می‌شوند. شکل ۱۶ قسمت الف نشان می‌دهد که وقتی آنتن ۱ در موقعیت سر قرار دارد، پهنای باند کار به دلیل تأثیر بدن انسان کوتاه می‌شود و ضریب بازتاب آنتن ۲ تفاوت قابل توجهی بین سر و فضای آزاد ندارد. اگر ضریب بازتاب کمتر از ۶- دسی‌بل باشد، محصولات بی‌سیم موجود در بازار را می‌توان پذیرفت [۲۴-۲۶] و هنگامی که آنتن پیشنهادی روی سر قرار دارد پارامتر S کمتر از ۶- دسی‌بل است. شکل ۱۶ قسمت ب ایزولاسیون بین آنتن ۱ و آنتن ۲ را نشان می‌دهد، ایزولاسیون تقریباً کمتر از ۱۰- دسی‌بل است که روی سر یا در فضای آزاد است.

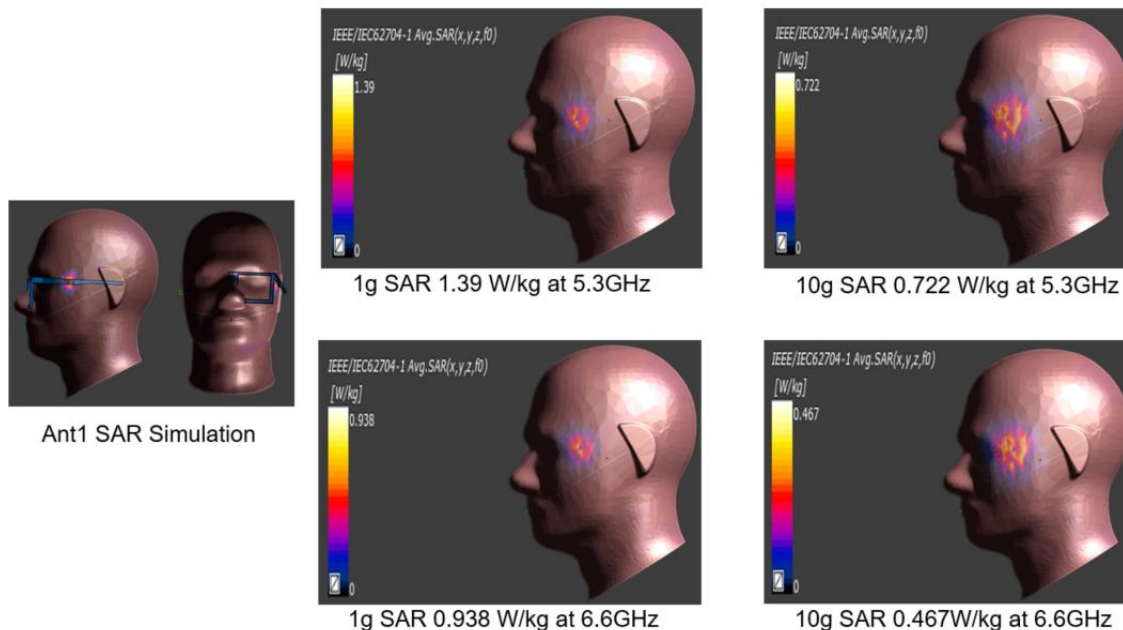


شکل ۱۶: شبیه‌سازی آنتن‌ها در روی سر و فضای آزاد الف) پارامترهای پراکندگی برای آنتن ۱ و آنتن ۲ ب) ایزولاسیون بین آنتن ۱ و آنتن ۲ [۳۱]  
Figure 16. Simulation of antennas in overhead and free space a) Scattering parameters for antenna 1 and antenna 2 b) Isolation between antenna 1 and antenna 2 [31]

روش محاسبه آهنگ جذب ویژه انرژی توان تابشی است که توسط یک واحد حجم در یک زمان خاص جذب می‌شود، همان‌طور که در رابطه زیر نشان داده شده است [۲۶].

$$AR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dw}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dw}{\rho dv} \right) \quad (1)$$

با توجه به این که آنتن ۱ و آنتن ۳ در سیستم آنتنی شیاری چند ورودی-چند خروجی  $4 \times 4$  به سر انسان از آنتن‌های دیگر نزدیک‌تر هستند و نیز ساختار آنتن متقارن است، لذا فقط مقدار آهنگ جذب ویژه آنتن ۱ شبیه‌سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، هنگامی که آنتن ۱ به اندازه ۱۰ میلی‌متر از سر فاصله دارد، توان ورودی از نقطه تغذیه ۰/۱ وات (۲۰ dBm) است، و فرکانس کاری در  $5/3$  گیگاهرتز و  $6/6$  گیگاهرتز برای محاسبه مقادیر ۱ گرم آهنگ جذب ویژه و ۱۰ گرم آهنگ جذب ویژه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، ۱ گرم آهنگ جذب ویژه و ۱۰ گرم آهنگ جذب ویژه آنتن ۱ در فرکانس  $5/3$  گیگاهرتز،  $1/39$  وات بر کیلوگرم و  $0/722$  وات بر کیلوگرم است ۱ گرم آهنگ جذب ویژه و ۱۰ گرم آهنگ جذب ویژه در  $6/6$  گیگاهرتز به ترتیب  $0/938$  وات بر کیلوگرم و  $0/467$  وات بر کیلوگرم هستند. بنابراین، مقادیر آهنگ جذب ویژه فوق همگی کمتر از حد مجاز استاندارد هستند.

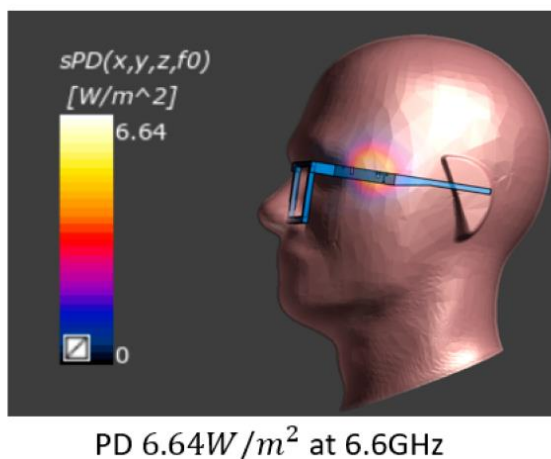


شکل ۱۷: نتایج شبیه‌سازی آهنگ جذب ویژه آنتن ۱ در فرکانس‌های ۵/۳ و ۶/۶ گیگاهرتز [۳۱]  
 Figure17. The results of the simulation of the specific absorption rate of antenna 1 at the frequencies of 5.3 and 6.6 GHz [31]

با توجه به الزامات تست نظارتی کمیسیون ارتباطات فدرال، هنگامی که دستگاه پوشیدنی از باند فرکانس بالای ۶ گیگاهرتز پشتیبانی می‌کند، چگالی توان باید اندازه‌گیری شود. فرکانس تست چگالی توان جایی انتخاب می‌شود که نقطه فرکانس بدترین مقدار آهنگ جذب ویژه را داشته باشد و مقدار حد ایمنی چگالی توان 10 وات بر مترمربع است. معادله به صورت زیر است [۲۷].

$$S_{inc}^m = (A, d, \beta_x) = \frac{1}{A} \int_A \left| \text{Re} \left[ E(d, \beta_x) \times H^*(d, \beta_x) \right] \right| d_s \quad (2)$$

شکل ۱۸ آنتن ۱ را زمانی نشان می‌دهد که توان ورودی از نقطه تغذیه ۰/۱ وات (۲۰dBm) باشد و فرکانس ۶/۶ گیگاهرتز برای محاسبه مقدار چگالی توان است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، چگالی توان آنتن ۱ در ۶/۶ گیگاهرتز ۶/۶۴ وات بر متر مربع است، که کمتر از حد ۱۰ وات بر مترمربع است.



شکل ۱۸: نتایج شبیه‌سازی آهنگ جذب ویژه و چگالی توان آنتن ۱ در فرکانس‌های ۵/۳ و ۶/۶ گیگاهرتز [۳۱]  
 Figure18. Simulation results of specific absorption rate and power density of antenna 1 at frequencies of 5.3 and 6.6 GHz [31]



## ۴- تعیین مشخصات تجربی

## ۴-۱- تجزیه و تحلیل پارامترهای S

کار ساخت آنتن عینک چند ورودی-چند خروجی  $4 \times 4$  تکمیل شده است. برای جلوگیری از عملکرد غیرعادی آنتن به دلیل تغییر شکل پایه‌ها از لحیم‌کاری در دمای پایین استفاده می‌شود. از آنجایی که زیر لایه آنتن پیشنهادی ضخیم است و از مواد پلاستیکی با نقطه ذوب پایین ساخته شده، استفاده از لوله مسی یا کانکتور برای اندازه‌گیری مناسب نیست. بنابراین برای اندازه‌گیری از کابل کوکسیال با لحیم‌کاری در دمای پایین استفاده می‌شود. مدل تحلیلی شبکه آگیلنت<sup>۱</sup> مدل E5071C است و از روش شیار برای کالیبره کردن قبل از اندازه‌گیری استفاده می‌گردد، اما اتلاف به دلیل لحیم‌کاری و عدم توانایی در کالیبره کردن کابل کوکسیال وجود دارد. اندازه‌گیری پارامتر پراکندگی در فضای آزاد در شکل ۱۹ نشان داده شده است و عینک برای اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی بر روی سر انسان بسته می‌شود.

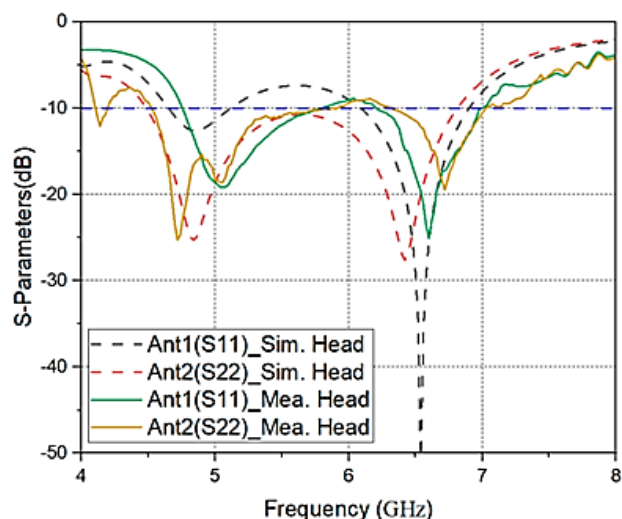


شکل ۱۹: اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی در فضای آزاد [۳۱]

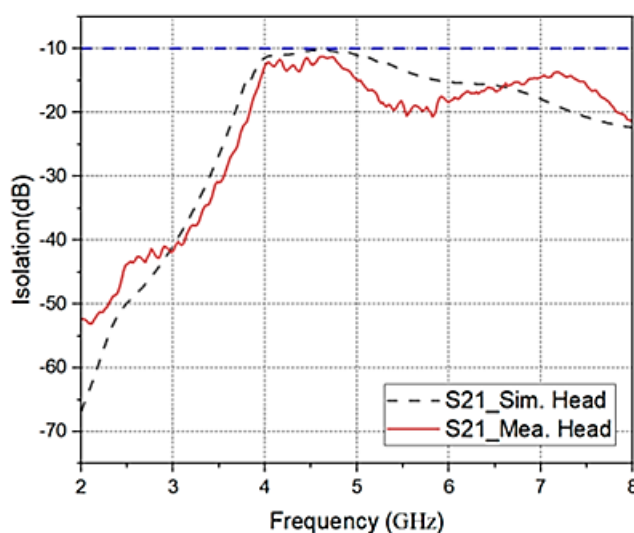
Figure 19. Measurement of scattering parameters in free space [31]

آنتن پیشنهادی بر روی عینک طراحی شده است، بنابراین لازم است پارامتر پراکندگی عینک بر روی سر انسان اندازه‌گیری شود. از آنجایی که آنتن پیشنهادی یک آنتن متقارن است، از پایه سمت چپ که آنتن ۱ و آنتن ۲ قرار دارند برای اندازه‌گیری پارامتر پراکندگی استفاده می‌شود. شکل ۲۰ قسمت الف اندازه‌گیری ضریب بازتاب و شبیه‌سازی آنتن ۱ و آنتن ۲ را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری بسیار مشابه هستند. برای آنتن ۲، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری هر دو به سمت فرکانس‌های پایین حرکت می‌کنند. شکل ۲۰ قسمت ب نتیجه ایزولاسیون آنتن ۱ و آنتن ۲ را نشان می‌دهد. هر دو مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری کمتر از  $10^{-1}$  دسی‌بل هستند و روند سازگار است.

<sup>۱</sup> Agilent



(الف)



(ب)

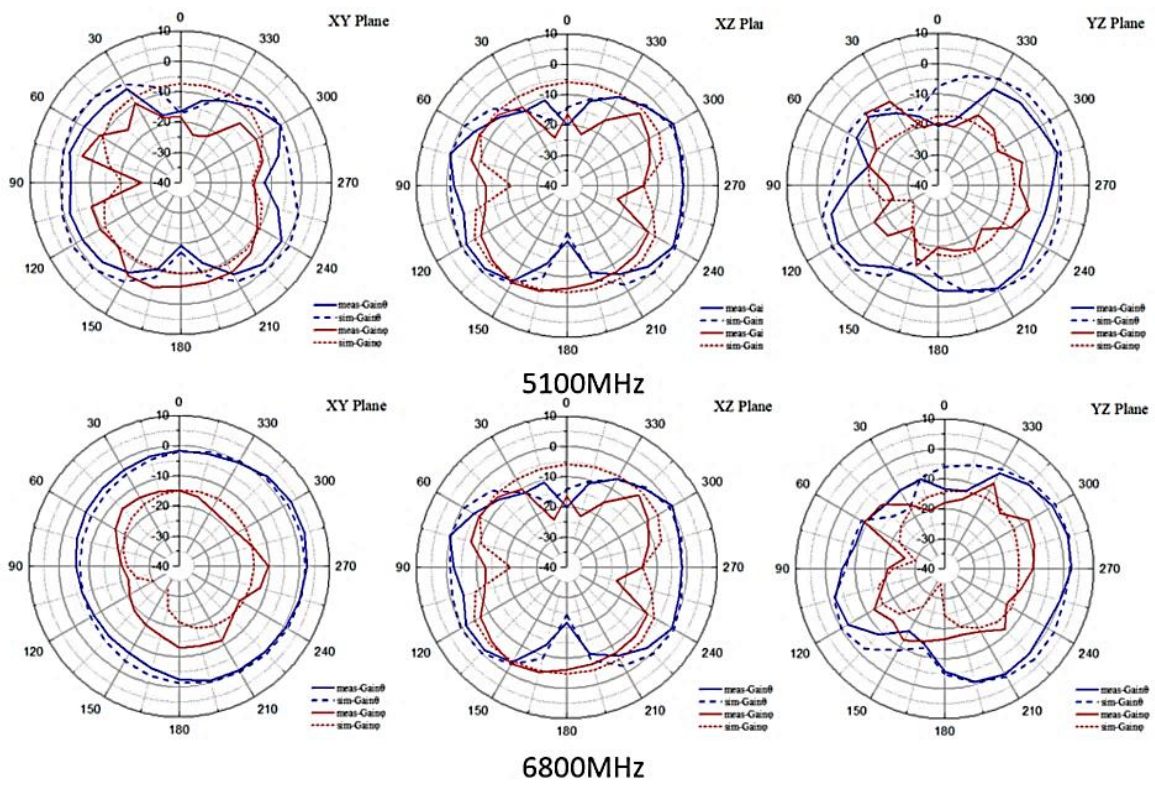
شکل ۲۰: نتایج اندازه‌گیری آنتن عینک بر روی سر (الف) اندازه‌گیری ضریب بازتاب و شبیه‌سازی آنتن ۱ و آنتن ۲، (ب) ایزولاسیون آنتن ۱ و آنتن ۲ [۳۱]

Figure 20. The results of measuring the Eyewear antenna on the head (a) measuring the reflection coefficient and simulating antenna 1 and antenna 2 (b) isolation of antenna 1 and antenna 2 [31]

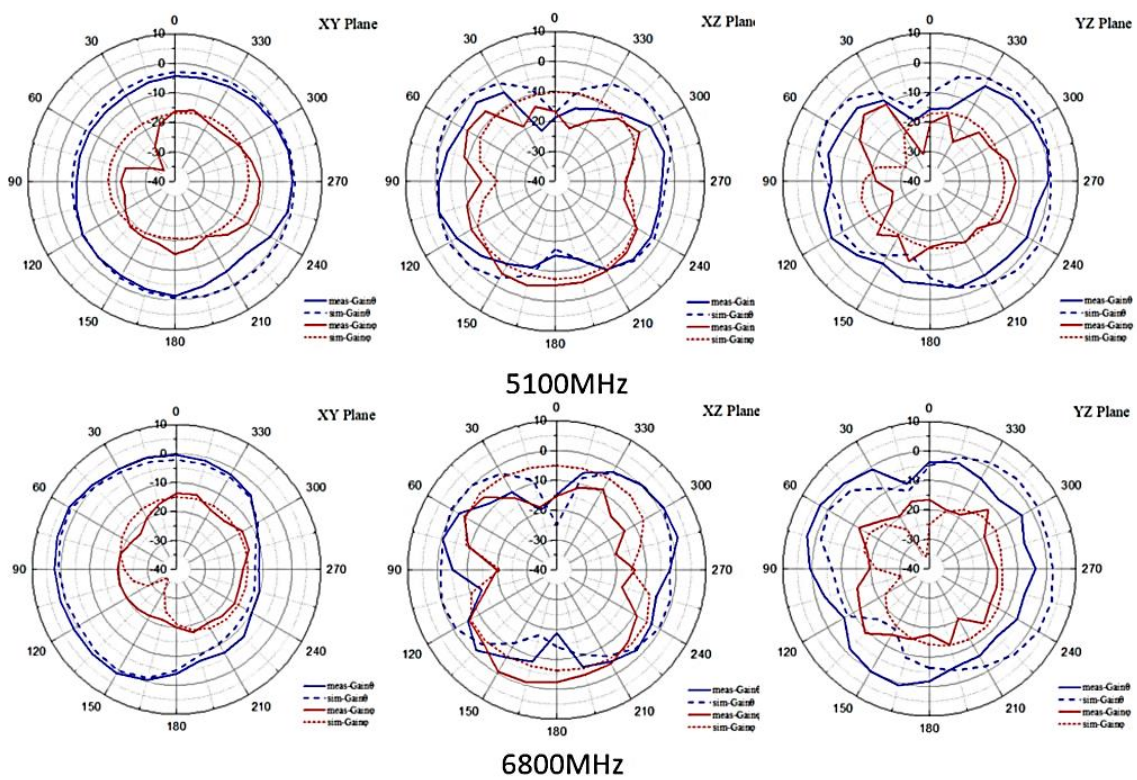
#### ۲-۴- الگوهای تشعشعی

از نتایج شکل‌های قبلی می‌توان دریافت که حالت‌های تشدید چهار آنتن مشابه هستند. بنابراین از آنتن ۱ و آنتن ۲ برای آزمایش میدان دور در این مقاله استفاده شده است. میدان اندازه‌گیری مورد استفاده یک محفظه میدان دور استاندارد است، تحلیلگر شبکه آنریتسو<sup>۱</sup> مدل MS46524B و باند فرکانس اندازه‌گیری آنتن هورن در محفظه ۸-۰/۱ گیگاهرتز است. آنتن عینک پیشنهادی در پلاریزاسیون خطی کار می‌کند. در یک محدوده دریافت خاص، دریافت سیگنال بهتری نسبت به یک آنتن قطبی دایره‌ای خواهد داشت. در حال حاضر، آنتن‌های پلاریزه خطی به‌طور گسترده در محصولات ارتباطی بی‌سیم استفاده می‌شود. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ الگوهای میدان بهره دوبعدی آنتن عینک هوشمند شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده را در صفحه XY، صفحه XZ و صفحه YZ نشان می‌دهند. از شکل‌های ۲۱ و ۲۲ می‌توان دریافت که حالت‌های تشعشعی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده زمانی که آنتن ۱ و آنتن ۲ در فرکانس کاری ۵/۱ گیگاهرتز و ۶/۸ گیگاهرتز باشند روند یکسانی دارند [۳۱].

<sup>۱</sup> Anritsu



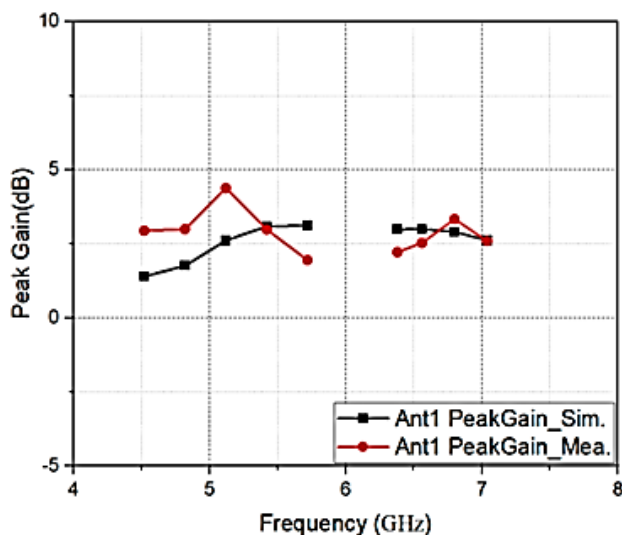
شکل ۲۱: نتایج اندازه گیری الگوهای تشعشعی دوبعدی برای آنتن ۱ عینک هوشمند [۳۱]  
 Figure21. Measurement results of two-dimensional radiation patterns for antenna 1 of smart glasses [31]



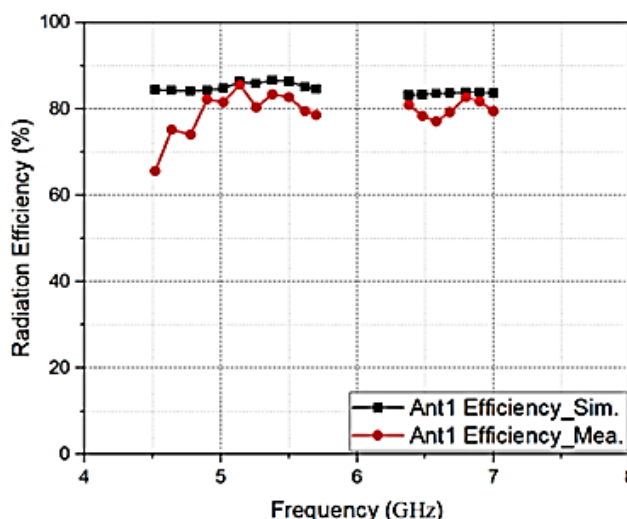
شکل ۲۲: نتایج اندازه گیری الگوهای تشعشعی دوبعدی برای آنتن ۲ عینک هوشمند [۳۱]  
 Figure22. Measurement results of two-dimensional radiation patterns for antenna 2 of Eyewear [31]

۳-۴- بهره آنتن، کارایی و ضریب همبستگی پوش

بهره و بازده آنتن ۱ را می توان در شکل ۲۳ قسمت های الف و ب مشاهده کرد. فرکانس کاری آنتن ۱ می تواند به پیک بهره ۴/۳ dBi و بازده آنتن ۸۵/۶۹ درصد در فضای آزاد در فرکانس ۵/۱۴ گیگاهرتز برسد و به ۳/۳ dBi و راندمان آنتن ۸۲/۷۸ درصد در فضای آزاد در ۶/۸ گیگاهرتز برسد.



(الف)



(ب)

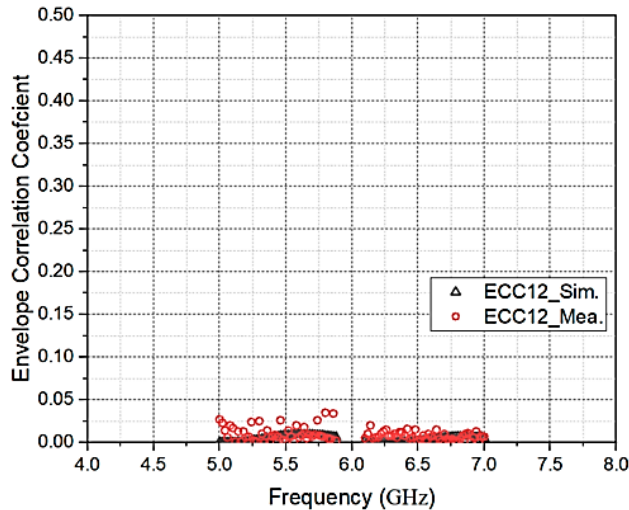
شکل ۲۳: نتایج اندازه گیری برای آنتن ۱ عینک هوشمند (الف) بهره، و (ب) راندمان [۳۱]  
Figure23. Measurement results for antenna 1 of Eyewear (a) gain, and (b) efficiency[31]

هنگامی که آنتن متعلق به سیستم چند ورودی-چند خروجی است، معمولاً از مقدار ضریب همبستگی پوش<sup>۱</sup> برای قضاوت در مورد خوب بودن استقلال آنتن استفاده می شود. اثر تزویج متقابل بین دو آنتن زمانی که مقدار ضریب همبستگی پوش کمتر است ضعیف است و نرخ انتقال کمتری تحت تأثیر قرار می گیرد. مقدار محدود ضریب همبستگی پوش شناخته شده بین المللی ۰/۵ است. مقادیر ضریب همبستگی پوش دو آنتن را می توان با استفاده از معادله (۳) پارامتر S به صورت زیر محاسبه کرد [۱۶].

<sup>۱</sup> Envelope Correlation Coefficient

$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (3)$$

شکل ۲۴ اندازه‌گیری ضریب همبستگی پوش و مقایسه شبیه‌سازی آنتن ۱ و آنتن ۲ را در یک پایه نشان می‌دهد. بازهم مشاهده می‌شود که در باند فرکانس کاری مؤثر، مقادیر ضریب همبستگی پوش اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده از ۰/۰۵ تجاوز نمی‌کند و استقلال آنتن خوب است.



شکل ۲۴: نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ضریب همبستگی پوش برای آنتن ۱ و ۲ [۳۱]  
Figure 24. Results of simulation and measurement of ECC for antenna 1 and 2 [31]

جدول ۴ مقایسه‌ای بین آنتن‌های عینک هوشمند در مراجع مختلف را ارائه می‌دهد. مشاهده می‌شود که آنتن‌های مرجع [۱۳، ۱۴] فقط از وای فای ۲.۴ گیگاهرتز پشتیبانی می‌کنند و راندمان آنتن خوب نیست. به‌عنوان مثال، در [۳]، راندمان آنتن تنها ۱۰/۷٪ است. کاربرد آنتن عینک هوشمند ۶۰ گیگاهرتز در مراجع [۴] و [۲۸] ذکر شده است. اگرچه منابع [۴] و [۲۸] دارای بهره آنتن بالایی هستند، اما طراحی پیچیده آنتن آرایه‌ای، تحقق سیستم چند ورودی-چند خروجی روی عینک را دشوار می‌کند. پس از مقایسه مراجع باندهای فرکانس LTE، مراجع [۲۰] و [۲۹] از باندهای فرکانسی LTE متعدد پشتیبانی می‌کنند، اما بهره آنتن خوب نیست و فرکانس کاری پیوسته نیست. مرجع [۳۰] از یک آنتن قاب عینک استفاده می‌کند و از اینترنت اشیا ۵/۸ گیگاهرتز پشتیبانی می‌کند، اما عملکرد چند ورودی-چند خروجی را نداشت. به‌طور خلاصه، هیچ طراحی آنتنی از وای فای نسل ۶ توسعه‌یافته در مراجع فعلی پشتیبانی نمی‌کند. باین‌حال، آنتن عینک مرجع [۳۱] دارای پهنای باند کاری گسترده، راندمان آنتن بالا، افزایش آنتن‌دهی بالا، پشتیبانی از عینک چند ورودی-چند خروجی ۴ × ۴ است و می‌تواند روی باندهای وای فای نسل ۵ و ۶ توسعه‌یافته اعمال شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بعد از مطالعه امکان‌سنجی در سه مکان مختلف (پشت گوش، جلوی گوش و نزدیک به چشم) برای عناصر متقابل، پتانسیل پهنای باند و تأثیر ناشی از نزدیک شدن آنتن به سر و شبیه‌سازی مقدار آهنگ جذب ویژه در این آنتن‌ها مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که قرار دادن آنتن درست در جلوی گوش بدترین پتانسیل پهنای باند را دارد. در محل پشت گوش بالاترین پتانسیل پهنای باند شناسایی شد. برای مقادیر آهنگ جذب ویژه، حداقل مقدار، با مکان "نزدیک به چشم" در مقایسه با دو مکان دیگر مشاهده گردید. بعد از شبیه‌سازی سه آنتن با پوشش و قاب دی‌الکتریک طراحی شدند. اولین آنتن که در موقعیت پشت گوش قرار می‌گیرد، دارای بالاترین پهنای باند از ۷۰۰ مگاهرتز تا ۲/۷ گیگاهرتز با سه عنصر شبکه تطبیق در تغذیه است. آنتن‌های طراحی شده بعدی به ترتیب پهنای باند ۶۶۰-۷۰۰ مگاهرتز و ۲/۷-۱/۷ گیگاهرتز را پوشش می‌دهند. راندمان تشعشعی شبیه‌سازی شده عموماً در سطح ۱۲- دسی‌بل برای باند پایین و ۷- دسی‌بل برای باند بالا

است. برای ارزیابی واقعی دستگاه شبیه‌سازی‌ها با دست کاربر و در شرایط فضای آزاد انجام شدند. از طریق شبیه‌سازی‌ها نشان داده شد که وجود دست باعث کاهش قابل توجهی در تطبیق نمی‌شود. در ادامه آنتن چند ورودی-چند خروجی  $4 \times 4$  دو بانده برای باندهای ارتباطی وای‌فای نسل ۵ و ۶ توسعه‌یافته بررسی شد. بهره و بازده آنتن پیشنهادی  $4/3$  dBi و  $85/69$  درصد در فرکانس  $5/14$  گیگاهرتز و  $3/3$  dBi و  $82/78$  درصد در فرکانس  $6/8$  گیگاهرتز در فضای آزاد است. ضریب همبستگی پوش آنتن نیز کمتر از  $0/05$  است که آنتن مورد بررسی کاندید خوبی برای ارتباطات وای‌فای نسل ۵ و ۶ توسعه‌یافته می‌تواند باشد. در نهایت در جدولی آنتن‌های مختلفی با کاربردهای عینک هوشمند از لحاظ پهنای باند، راندمان و گین از مراجع مختلف بررسی و مزایا و معایب‌شان آورده شد.

جدول ۴: مقایسه بین مزایا و معایب آنتن‌های تعدادی از مراجع  
Table 4. Comparison between the advantages and disadvantages of antennas from a number of references

مرجع	نوع آنتن	مورد استفاده	پهنای باند (گیگاهرتز)	راندمان (%)	گین (dBi)	چند ورودی-چند خروجی	مزایا
[۱]	شفاف و قابل انعطاف	عینک هوشمند	۲/۴-۲/۵	۴۶/۸	۳/۵۶	-	سادگی ساخت
[۳]	مونوپل لوپ	عینک هوشمند	مونوپل: ۲/۳۲-۲/۵ لوپ: ۲/۳۵-۲/۵	مونوپل: ۱۰/۷ لوپ: ۳۳/۹	مونوپل: ۱۱/۶ لوپ: ۲/۷	$2 \times 2$	-
[۴]	آرایه	عینک هوشمند	وای‌گیگ: ۵۵-۶۶	وای‌گیگ: ۵۸	۶۰ گیگاهرتز: ۱۱	-	کاربرد در فرکانس‌های بسیار بالا
[۱۴]	آنتن پیچ	عینک هوشمند	۲/۴۵ گیگاهرتز: ۲/۴۳-۲/۴۸	۲/۴۵ گیگاهرتز: ۲۳	۲/۴۵ گیگاهرتز: ۱/۰۸	$2 \times 2$	-
[۲۰]	عنصر متقابل	عینک هوشمند	۰/۷-۲/۷	باند بالا: ۶۳ باند پایین: ۵۸	باند بالا: ۰/۶۵ باند پایین: ۵/۰۳	-	پشتیبانی از باندهای LTE
[۲۸]	آرایه	عینک هوشمند	۶۰ گیگاهرتز: ۵۹/۰۵-۶۰/۱	-	۶۰ گیگاهرتز: ۹/۲۹	-	کاربرد در فرکانس‌های بسیار بالا
[۲۹]	شیار حلقه ای	عینک هوشمند	۰/۸۲-۰/۹۶ ۱/۷۱-۲/۶۹ ۳/۳-۳/۶ ۴/۸-۵	باند بالا: ۸۶/۵ باند پایین: ۹۸	باند بالا: ۲/۶۷ باند پایین: ۳/۷۲	LTE $2 \times 2$ $4 \times 4$	پشتیبانی از باندهای LTE
[۳۰]	قاب	عینک هوشمند	۵/۴۲-۶/۲۷	-	۸/۱۸	-	پشتیبانی از اینترنت اشیا
[۳۱]	شیار	عینک هوشمند	۴/۵۸-۵/۷۲ ۶/۳۸-۷	۸۵/۷ ۸۲/۸	۴/۳ ۳/۳	$4 \times 4$	پهنای باند گسترده، راندمان بالا

## مراجع

- [1] S. Hong, S. H. Kang, Y. Kim and C. W. Jung, "Transparent and Flexible Antenna for Wearable Glasses Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, pp. 2797-2804, July 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2554626.
- [2] K. Faith and Z.E. Atef, "Smart Glasses Radiation Effects on a Human Head Model at Wi-Fi and 5G Cellular Frequencies," in *Proceedings of the International ACES Communications*, Beijing, China, 29 July-1 August 2018, doi: 10.3390/electronics10232936.
- [3] A. Cihangir, F. Gianesello and C. Luxey, "Dual-Antenna Concept With Complementary Radiation Patterns for Eyewear Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 6, pp. 3056-3063, June 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2819822.

- [4] A. Bisognin et al., "Ball Grid Array-Module With Integrated Shaped Lens for WiGig Applications in Eyewear Devices," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 3, pp. 872-882, March 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2517667.
- [5] A. Cihangir et al., "Investigation of the effect of metallic frames on 4G eyewear antennas," *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2014, pp. 60-63, doi: 10.1109/LAPC.2014.6996320.
- [6] H. Nakano and J. Yamauchi, "Printed Slot and Wire Antennas: A Review," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2158-2168, July 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2180269.
- [7] S.C. Chen and M.C. Hsu, "LTE MIMO Closed Slot Antenna System for Laptops with a Metal Cover," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 28973-28981, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2901964.
- [8] I. R. R. Barani and K. -L. Wong, "Integrated Inverted-F and Open-Slot Antennas in the Metal-Framed Smartphone for 2×2 LTE LB and 4×4 LTE M/HB MIMO Operations," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 10, pp. 5004-5012, Oct. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2854191.
- [9] Q. Cai, Y. Li, X. Zhang and W. Shen, "Wideband MIMO Antenna Array Covering 3.3—7.1 GHz for 5G Metal-Rimmed Smartphone Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 142070-142084, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944681.
- [10] C.T. Liao, Z.K. Yang and H.M. Chen, "Multiple Integrated Antennas for Wearable Fifth-Generation Communication and Internet of Things Applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120328-120346, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107730.
- [11] M. Jalali; M.N. Moghadasi and R.A. Sadeghzadeh, "Dual circularly polarized multilayer MIMO antenna array with an enhanced SR-feeding network for C-band application," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 9, no. 8: Biomedical Applications of RF/Microwave and Optics Technologies, pp. 1741 - 1748, Oct. 2017, doi: 10.1017/S1759078717000435.
- [12] S. Choi and J. Choi, "Miniaturized MIMO antenna with a high isolation for smart glasses," *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Verona, Italy, 2017, pp. 61-63, doi: 10.1109/APWC.2017.8062241.
- [13] M. Jalali, T. Sedghi and S. Shafei, "Dual-band antenna fed with CPW technology using modified mirrored L-shaped conductor-back plane," *Wireless personal communications*, vol. 78, no. 2, pp. 881-887, 2014, doi: 10.1007/s11277-014-1789-9.
- [14] J. Kulkarni, A. Desai and C.Y. Desmond, "Wideband Four-Port MIMO Antenna Array with High Isolation for Future Wireless Systems," *Int. J. Electron. Commun.*, vol. 128, p. 153507, 2021, doi: 10.1016/j.aeue.2020.153507.
- [15] M. A. Ul Haq and S. Koziel, "Ground Plane Alterations for Design of High-Isolation Compact Wideband MIMO Antenna," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48978-48983, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2867836.
- [16] H. Khalid, W.A. Awan, M. Hussain, A. Fatima, M. Ali, N. Hussain, S. Khan, M. Alibakhshikenari and E. Limiti, "Design of an Integrated Sub-6 GHz and mmWave MIMO Antenna for 5G Handheld Devices," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 18, p. 8331, 2021, doi: 10.3390/app11188331.
- [17] T. T. T. Le and T. -Y. Yun, "Wearable Dual-Band High-Gain Low-SAR Antenna for Off-Body Communication," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 7, pp. 1175-1179, July 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3074641.
- [18] A. Cihangir et al., "Dual-Band 4G Eyewear Antenna and SAR Implications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 2085-2089, April 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2670562.
- [19] "RF Exposure Procedures and Equipment Authorization Policies for Mobile and Portable Devices," Available online: <https://apps.fcc.gov/oetcf/kdb/forms/FTSSearchResultPage.cfm?switch=P&id=20676>.

- [20] "IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques," in *IEEE Std 1528-2003*, vol., no., pp.1-120, 19 Dec. 2003, doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94414.
- [21] "FCCWi-Fi 6E RF Exposure—FCC Report," Available online: <https://fcc.report/FCC-ID/MSQI005D/5126834.pdf> (accessed on 4 February 2021).
- [22] M.A. Chung and W.H. Chang, "Low-cost, low-profile and miniaturized single-plane antenna design for an Internet of Thing device applications operating in 5G, 4G, V2X, DSRC, WiFi 6 band, WLAN, and WiMAX communication systems," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 62, pp. 1765–1773, 2020, doi: 10.1002/mop.32229.
- [23] M. Jalali and T. Sedghi, "Circularly Polarized MIMO Antenna Array with Enhanced Characteristics using EBG structure," *ELECTRONIC INDUSTRIES*, vol. 10, no. 2, pp. 13-24, 2019, sid: paper/229582/en.
- [24] P. Yang, "Reconfigurable 3-D Slot Antenna Design for 4G and Sub-6G Smartphones with Metallic Casing," *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 216, 2020, doi: 10.3390/electronics9020216.
- [25] W. He, B. Xu, Y. Yao, D. Colombi, Z. Ying and S. He, "Implications of Incident Power Density Limits on Power and EIRP Levels of 5G Millimeter-Wave User Equipment," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148214–148225, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015231.
- [26] Y. Hong and J. Chou, "60 GHz Patch Antenna Array with Parasitic Elements for Smart Glasses," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, pp. 1252–1256, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2841512.
- [27] Y. -Y. Wang, Y. -L. Ban and Y. Liu, "Sub-6GHz 4G/5G Conformal Glasses Antennas," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 182027-182036, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2959603.
- [28] Y. Wang, J. Zhang, F. Peng and S. Wu, "A Glasses Frame Antenna for the Applications in Internet of Things," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8911-8918, Oct. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2924236.
- [29] M.-A. Chung, C.-W. Hsiao, C.-W. Yang and B.-R. Chuang, "4 × 4 MIMO Antenna System for Smart Eyewear in Wi-Fi 5G and Wi-Fi 6e Wireless Communication Applications," *Electronics*, vol. 10, p. 2936, 2021, doi: 10.3390/electronics10232936.
- [30] K. N. Paracha et al., "A Low Profile, Dual-band, Dual Polarized Antenna for Indoor/Outdoor Wearable Application," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 33277-33288, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894330.
- [31] S.Rezaee and Y.Zehforoosh, "Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials," *Journal of Communication Engineering*, vol. 11, no. 43, pp. 15-26, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.689028. (in Persian).

---

**COPYRIGHTS**

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. 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>

---

