

**Original Research Paper**

# A Reconfigurable and Steerable Horn Antenna Using Plasma Dielectric Slabs for Controllable Gain and Beam Steering

Jafar Bazrafshan<sup>1</sup> , Fatemeh Sadeghikia<sup>2\*</sup> , Ali Karami Horestani<sup>3</sup> , and Mohamed Himdi<sup>4</sup> 

1, 2, 3. Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

4. University of Rennes 1, Rennes, France

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

Received 17 July 2023

Revised 18 September 2023

Accepted 25 September 2023

Available Online 25 September 2023

**Keywords:**

Horn antenna

Dielectric plasma slabs

Beam direction

Gain control

Reconfigurable antenna

Beam steering antenna

**ABSTRACT**

This paper presents a novel approach for designing a reconfigurable and steerable antenna utilizing plasma dielectric slabs along the aperture of a pyramidal horn antenna. The antenna provides electronic control over the radiation gain and the direction of the main beam. The proposed configuration consists of four plasma slabs aligned perpendicular to the horn aperture along the horn axis, supplemented by four diagonally connected plasma slabs. Each plasma slab can be independently switched on or off, enabling dynamic adjustment of the radiation gain and steering of the main beam. Numerical investigations demonstrate that toggling the plasma slabs or controlling the plasma frequency allows precise control over the pyramidal horn antenna's radiation gain and beam steering. Selecting appropriate dimensions and angles for the plasma slabs is crucial in achieving the desired beam steering angle and radiation gain control. To validate the concept, the proposed antenna configuration is designed and numerically simulated at a frequency of 10 GHz. The results indicate that the radiation gain of the antenna can be significantly enhanced, reaching up to 6.5 dBi, and the main beam direction can be steered within a range of  $\pm 12^\circ$ . This research presents a promising approach for achieving reconfigurability and beam steering capabilities in antenna systems by utilizing plasma dielectric slabs. The proposed design offers enhanced performance and flexibility, making it suitable for various applications in antenna technology. The ability to control beam steering and radiation gain without mechanical devices is essential in satellite and space communications.

\*Corresponding Author's E-mail: [sadeghi\\_kia@ari.ac.ir](mailto:sadeghi_kia@ari.ac.ir)

**How to Cite this Article:**

J. Bazrafshan, F. Sadeghikia, A. Karami Horestani, and M. Himdi, "A reconfigurable and steerable horn antenna using plasma dielectric slabs for controllable gain and beam steering," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 28-44, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1455>.

**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/).



# بازیکربندی و هدایت پرتو در آنتن شیپوری با استفاده از تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی باهدف کنترل مقدار بهره و جهت پرتو تشعشی

جعفر بذرافشان<sup>۱</sup>، فاطمه صادقی کیا<sup>۲\*</sup>، علی کریمی هرستانی<sup>۳</sup>، و محمد هیمدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۳- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

۴- استاد، دانشگاه رنس، رنس، فرانسه

## چکیده

در مقاله حاضر، مبتنی بر استفاده از دی‌الکتریک‌های پلاسمایی در امتداد روزنه آنتن شیپوری هرمی، آنتن جدیدی معرفی می‌شود که دارای قابلیت بازیکربندی و کنترل پذیری در مقدار بهره و جهت پرتو تشعشی است. در این آنتن، چهار تیغه پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه و در امتداد محور آنتن و چهار تیغه پلاسمایی دیگر به صورت مورب با تیغه‌های پلاسمایی قبل قرار دارند. برخورداری از قابلیت روشن و خاموش شدن مستقل هر تیغه و یا کنترل مقدار فرکانس پلاسمای در تیغه‌ها سبب می‌شود در هر حالت امکان هدایت پرتو تشعشی و نیز کنترل مقدار بهره برای آنتن وجود داشته باشد. تحلیل‌های پارامتری در خصوص گسترش طول تیغه‌های پلاسمایی و زاویه آنها نشان می‌دهد که انتخاب مقادیر اولیه مناسب برای ابعاد و زاویه تیغه‌ها نقش مهمی در بازه زاویه‌ای هدایت پرتو و مقدار بهره تشعشی آنتن دارد. این ساختار برای آنتن شیپوری هرمی در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz طراحی شده است و امکان طراحی آن برای سایر بازه‌های فرکانسی نیز وجود دارد. در نمونه طراحی شده، مقدار کنترل پذیری بهره تشعشی با استفاده از تیغه‌های پلاسمایی ۶/۵ dB و حداکثر میزان هدایت پرتو تشعشی تا  $\pm 12$  درجه مشاهده شده است. تغییر جهت پرتو آنتن بدون استفاده از ادوات مکانیکی و کنترل بهره تشعشی آن، با هدف کاهش هزینه سیستم‌های مخابراتی و مصرف بهینه توان الکترونیکی، در ارتباطات فضایی و کاربردهای راداری بسیار حائز اهمیت است.

## اطلاعات مقاله

### تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۶ تیر ۱۴۰۲

بازنگری ۲۷ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش ۳ مهر ۱۴۰۲

اولین انتشار ۳ مهر ۱۴۰۲

### واژه‌های کلیدی:

آنتن شیپوری هرمی

تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی

هدایت پرتو تشعشی

کنترل بهره

آنتن دارای قابلیت بازیکربندی

آنتن دارای قابلیت هدایت پرتو

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [sadeghi\\_kia@ari.ac.ir](mailto:sadeghi_kia@ari.ac.ir)

## How to Cite this Article:

J. Bazrafshan, F. Sadeghikia, A. Karami Horestani, and M. Himdi, "A reconfigurable and steerable horn antenna using plasma dielectric slabs for controllable gain and beam steering," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 28-44, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1455>.



## 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

$\omega_p$	فرکانس زاویه‌ای پلاسما
$\omega$	فرکانس زاویه‌ای
$v$	فرکانس برخورد
HPBW	عرض پرتو نیم‌توان
SLL	نسبت گلبرگ فرعی به گلبرگ اصلی
$\epsilon_r$	ضریب گذردهی الکتریکی نسبی

## مقدمه

پلاسما، به‌عنوان حالت چهارم ماده شناخته می‌شود و امروزه کاربردهای متنوعی در حوزه‌های مختلف صنعتی، تجاری، بهداشتی و نظامی دارد [۱، ۲]. یکی از جدیدترین زمینه‌های کاربرد پلاسما، استفاده از آن در ادوات مخابراتی است و آنتن‌های مبتنی بر پلاسما، یکی از نوظهورترین انواع آنتن‌های مخابراتی هستند که از مزایای قابل توجهی نسبت به سایر انواع آنتن‌ها برخوردار هستند. از مهم‌ترین مزایای این آنتن‌ها می‌توان به کوچک بودن سطح مقطع راداری [۲]، مقاوم بودن نسبت به جنگ الکترونیک [۳]، برخورداری از قابلیت بازپیکربندی از نظر فرکانس کاری و الگوی تشعشعی و نیز هدایت جهت پرتو تشعشعی [۴-۹] اشاره نمود. عموماً از پلاسما می‌توان به‌عنوان رسانای الکتریکی یا دی‌الکتریک در ساختار آنتن‌ها استفاده نمود. رایج‌ترین و ارزان‌ترین ساختار پلاسمایی، محفظه‌ی تجاری فلورسنت است که از یک پوسته دی‌الکتریک، به‌عنوان محفظه، و گاز بی‌اثر یونیزه شده داخل محفظه تشکیل می‌شود و در شکل‌ها و ابعاد مختلف در بازار قابل تهیه است.

پژوهش‌های تجربی و نظری انجام‌شده بر روی ستون پلاسما نشان می‌دهند که عوامل تحریک پلاسما، شامل توان و فرکانس تحریک، تأثیر مستقیمی بر مشخصات فیزیکی پلاسما دارند و بنابراین با کنترل الکتریکی عوامل تحریک می‌توان پلاسمایی ایجاد نمود که مشخصات فیزیکی آن به‌صورت الکترونیکی قابل کنترل است [۱۰-۱۴]. مبتنی بر این ویژگی‌ها، کاربردهای مختلفی از پلاسما در ساختار آنتن‌ها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته و در نتیجه، انواع مختلفی از آنتن‌های مبتنی بر فناوری پلاسما تاکنون معرفی شده‌اند [۱۵-۲۷]. هدایت جهت پرتو تشعشعی آنتن که رایجاً با استفاده از عناصر مکانیکی نظیر موتورها، یا استفاده از یکی از انواع سوئیچ‌ها در ساختار آنتن‌ها امکان‌پذیر بوده است، امروزه با استفاده از موادی نظیر پلاسما که دارای قابلیت بازپیکربندی هستند در ساختار آنتن‌ها امکان‌پذیر شده و پژوهش‌های متعددی نیز در این زمینه گزارش شده‌اند [۲۶-۲۲]. هدایت جهت پرتو در عمده این ساختارها مبتنی بر روشن و خاموش

کردن رساناهای پلاسمایی در ساختار آنتن ایجاد شده است [۲۵-۲۲]؛ لکن پژوهش‌های بسیار محدودی نیز مبتنی بر استفاده از خاصیت دی‌الکتریک پلاسما برای هدایت جهت پرتو آنتن در مراجع مشاهده می‌شوند [۲۶]. با این وجود و با توجه به قابلیت بازپیکربندی محیط پلاسما، می‌توان پیش‌بینی نمود که امکان ترکیب عناصر پلاسمایی، در حالت‌های رسانایی یا دی‌الکتریک، با انواع متنوع‌تری از آنتن‌ها نیز وجود داشته باشد.

با این رویکرد و به‌منظور بررسی امکان استفاده از دی‌الکتریک‌های پلاسمایی در ساختار آنتن‌ها به‌عنوان عامل هدایت پرتو تشعشعی آنتن، در این مقاله، امکان هدایت پرتو یک آنتن شیپوری هرمی بررسی می‌شود. در این راستا، از یک آنتن شیپوری هرمی در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz به‌عنوان تشعشع کننده اصلی و از تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی در فضای پیرامونی و در امتداد روزنه آنتن، به‌عنوان ابزار هدایت پرتو، استفاده می‌شود. با توجه به ویژگی خاموش و روشن شدن تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی مجاور تشعشع کننده شیپوری و نیز امکان کنترل مقدار فرکانس پلاسما در این تیغه‌ها، برخورداری از قابلیت بازپیکربندی و نیز هدایت پرتو تشعشعی این آنتن مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که این پژوهش، صرفاً امکان‌سنجی طرح پیشنهادی و مطالعه پارامتری آن است و پژوهش‌های بیشتر در زمینه پیاده‌سازی این طرح، به مطالعات آتی موكول خواهد شد. به‌طور خلاصه می‌توان ادعا نمود که نوآوری این مقاله، در استفاده از تیغه‌های پلاسمایی، به‌عنوان دی‌الکتریک، و نه به‌عنوان رسانا، در امتداد آنتن شیپوری، به دو صورت عمود بر دهانه روزنه آنتن و یا مورب با آن، برای ایجاد دو قابلیت "بازپیکربندی" و "هدایت جهت پرتو تشعشعی" به‌صورت همزمان برای آنتن است.

در این مقاله، پس از مرور مشخصات کلی محیط پلاسما در بخش دوم، ساختار پیشنهادی برای آنتن در بخش سوم معرفی می‌شود. از آنجا که این آنتن از ترکیب آنتن شیپوری هرمی با هشت تیغه پلاسمایی مستطیلی در امتداد بخش انتهایی آنتن شکل می‌گیرد و با توجه به این که هر کدام از تیغه‌های پلاسمایی مستقلاً قابلیت روشن و خاموش شدن دارند، حالت‌های مختلفی برای عملکرد آنتن وجود دارد. برخی از این حالات قابلیت کنترل مقدار بهره آنتن را دارند و در برخی دیگر، امکان هدایت پرتو تشعشعی آنتن ایجاد می‌شود. بنابراین، در بخش چهارم از این مقاله، برخی از حالت‌های عملکردی آنتن تشریح شده و مشخصات تشعشعی آنتن در آن حالت‌ها ارائه می‌شود. تیغه‌های پلاسمایی، علاوه بر برخورداری از قابلیت روشن و خاموش شدن، با استفاده از کنترل عوامل تحریک، می‌توانند دارای قابلیت کنترل مشخصات فیزیکی، نظیر تغییر فرکانس پلاسما نیز باشند. بررسی اثرات تغییر مشخصات فیزیکی

برابر صفر نباشد، صفر خواهد بود. در این حالت، ممکن است بدون وجود بارهای آزاد، میدان الکتریکی به صورت نوسانی در پلاسما وجود داشته باشد که اصطلاحاً به آن نوسانات پلاسما می‌گویند. در صورت تابش موج الکترومغناطیسی از خلأ به تیغه پلاسمایی، ضریب انعکاس و انتقال موج برابر هستند با [۲]:

$$R = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \quad (5)$$

$$T = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \quad (6)$$

با توجه به روابط بالا، چنانچه فرکانس پلاسما از فرکانس کاری آنتن به میزان قابل توجهی بزرگ‌تر باشد ( $\omega_p \gg \omega$ )، ضریب بازتاب از سطح پلاسما برابر منفی یک و ضریب انتقال در پلاسما برابر صفر می‌شود. در این حالت، تمامی موج تابیده شده به پلاسما منعکس شده و هیچ موجی وارد پلاسما نمی‌شود و بنابراین، پلاسما در حالت عملکردی رسانایی نسبت به موج تابشی قرار دارد.

چنانچه فرکانس پلاسما به میزان قابل توجهی کوچک‌تر از فرکانس کاری آنتن باشد ( $\omega_p \ll \omega$ )، ضریب بازتاب از سطح پلاسما برابر صفر و ضریب انتقال برابر یک می‌شود و بنابراین، کل موج، بدون انعکاس، وارد پلاسما می‌شود. در این حالت، پلاسما نسبت به فرکانس موج تابشی، در حالت عملکردی دی‌الکتریک قرار دارد.

حالت با اهمیت دیگری وجود دارد که فرکانس پلاسما در محدوده فرکانس کاری قرار دارد و با مقدار آن قابل مقایسه است. در این حالت، سه وضعیت عملکردی مختلف، به شرح ذیل، برای پلاسما وجود خواهد داشت: (۱) چنانچه فرکانس پلاسما از فرکانس کاری بزرگ‌تر باشد ( $\omega_p > \omega$ )، ثابت انتشار مقدار حقیقی خالصی دارد که به معنای تضعیف بدون انتشار است. در این حالت امپدانس ذاتی منفی شده و خاصیت رسانایی پلاسما غالب است؛ لکن مقدار قابلیت رسانایی آن در مقایسه با فلزات متداول کوچک‌تر خواهد بود.

این حالت عملکردی از پلاسما در مراجع متنوعی، با هدف توسعه آنتن دارای قابلیت بازیکربندی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. (۲) چنانچه فرکانس پلاسما از فرکانس کاری کوچک‌تر باشد ( $\omega_p < \omega$ )، ثابت انتشار موهومی خالص شده و با فرض صرف نظر از تلفات برخوردی، امواج الکترومغناطیسی بدون تضعیف در محیط پلاسما انتشار می‌یابند. در چنین حالتی، محیط پلاسما را می‌توان به‌عنوان دی‌الکتریک در نظر گرفت که قابلیت گذردهی الکتریکی

پلاسما در تیغه‌های پلاسمایی بر مشخصات تشعشعی آنتن نیز یکی دیگر از مواردی است که در بخش چهارم به آن پرداخته می‌شود. برای تحلیل‌ها، از نرم‌افزار تجاری تمام‌موج CST استفاده می‌شود. این پژوهش در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود.

## تئوری پلاسما

برای تحلیل اثر محیط پلاسما بر مشخصات تشعشعی آنتن، ابتدا برخی روابط حاکم بر محیط پلاسما در این فصل تشریح می‌شوند. قابلیت گذردهی مختلط پلاسمای همگن،  $\epsilon_r$ ، در شرایط کم‌فشار با رابطه زیر بیان می‌شود [۲]:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = 1 - \frac{\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2}{1 + \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^2} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2}{1 + \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^2} \quad (1)$$

که در آن،  $\omega_p$  فرکانس زاویه‌ای پلاسما (rad/s)،  $\nu$  فرکانس برخورد الکترون-خنثی (Hz) و  $\omega$  فرکانس کاری آنتن (rad/s) است. فرکانس زاویه‌ای پلاسما تابع مقدار چگالی الکترون،  $N$ ، بار الکترون،  $e$ ، و جرم الکترون،  $m_e$ ، است و رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2)$$

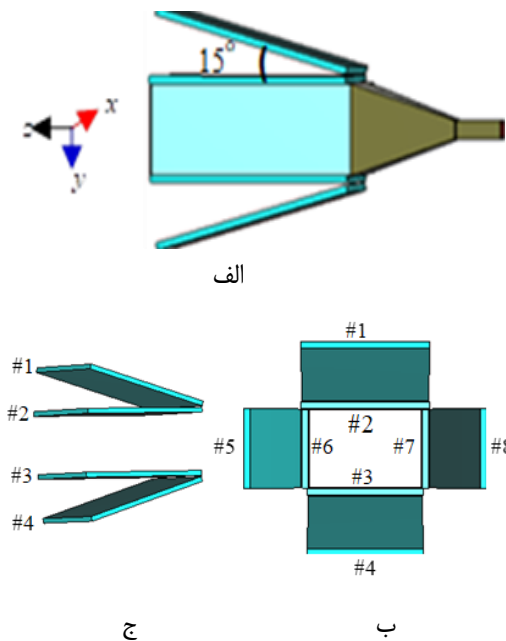
با صرف‌نظر از قسمت موهومی (در صورتی که فرکانس برخورد خیلی کوچک‌تر از فرکانس کار باشد) و به‌دست آوردن قسمت حقیقی معادله (۱)، قابلیت گذردهی محیط یونیزه شده با تقریب خوبی با معادله (۳) تخمین زده می‌شود.

$$\epsilon_r \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (3)$$

در این محیط، ثابت انتشار برابر است با:

$$\gamma = j\omega \sqrt{\mu \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)} \quad (4)$$

چنانچه مقدار فرکانس برخورد به میزان قابل توجهی از فرکانس پلاسما کوچک‌تر باشد، در همه روابط بالا می‌توان از فرکانس برخورد صرف‌نظر کرده و شکل ساده‌تری از معادلات را به‌دست آورد. در صورت صرف‌نظر کردن از فرکانس برخورد، زمانی که فرکانس پلاسما با فرکانس کاری برابر باشد، مقدار قابلیت گذردهی محیط پلاسما برابر صفر خواهد شد. صفر شدن قابلیت گذردهی به این مفهوم است که جابه‌جایی الکتریکی<sup>۱</sup> که تنها به بارهای آزاد بستگی دارد، حتی زمانی که شدت میدان الکتریکی



شکل ۱- ساختار آنتن شیپوری هرمی پیشنهادی مبتنی بر دی‌الکتریک‌های پلاسمایی: (الف) نمای جانبی، (نمای سه‌بعدی)، (ب) نمای روبرو، (ج) جزئیات مربوط به چینش تیغه‌ها.

**Fig. 1.** The proposed horn antenna structure based on plasma dielectric: (a) side view (3D view), (b) front view, (c) details on the slabs arrangement.

برای سهولت بررسی، در این ساختار تیغه‌های پلاسمایی با شماره‌هایی بین ۱ تا ۸ شماره‌گذاری شده‌اند و ترتیب این شماره‌ها در قسمت‌های (ب) و (ج) شکل ۱ نشان داده شده است. هر تیغه پلاسمایی مستقلاً قابلیت روشن و خاموش شدن دارد و برای روشن شدن هر تیغه باید توان تحریک مناسب به آن اعمال شود. ضخامت تیغه‌ها حدود ۵ mm است و چگالی پلازما و فرکانس برخورد در سرتاسر تیغه‌های تحریک‌شده ثابت فرض می‌شود. این مقادیر در هر بخش از پژوهش، متناسب با نوع کاربرد، اعلام می‌شود. با وجود آن که پلاسمای مورد نظر در پژوهش‌های مخابراتی عموماً گازی شکل هستند، در عمل باید از یک محفظه دی‌الکتریک برای محصور نمودن پلازما استفاده شود. محفظه‌های تجاری فلورسنت به‌میزان قابل قبولی امکان پیاده‌سازی نمونه آزمایشگاهی بسیاری از ساختارهای آنتن‌های پلاسمایی را تاکنون داشته‌اند و ترکیبات مختلفی با این محفظه‌های تجاری به شکل‌های مختلف استوانه‌ای، صفحه‌ای و سطوح محدب یا مقعر توسعه یافته است [۲۷-۱۶]. با این وجود، با توجه به آن که هدف از این مقاله امکان‌سنجی تحقق طرح پیشنهادی است، جزئیات بیشتر مربوط به نحوه تحقق آنتن در مطالعات آتی ارائه خواهد شد.

نسبی آن عددی بین صفر و یک است. با وجود ظرفیت بسیار بالایی که برای این حالت عملکردی پلازما در حوزه مخابرات و توسعه آنتن‌های دارای قابلیت بازیگر بندی می‌توان متصور بود، پژوهش‌های بسیار محدودی در این زمینه گزارش شده‌اند [۲۷-۲۶] و می‌توان پیش‌بینی نمود که طی سال‌های آینده توجه پژوهشگران زیادی به بهره‌برداری از این حالت عملکردی پلازما معطوف شود. آنتن پیشنهاد شده در این پژوهش، از این حالت عملکردی پلازما برای هدایت جهت پرتو تشعشعی آنتن شیپوری استفاده می‌کند. (۳) زمانی که فرکانس پلازما و فرکانس کاری برابر باشد با تقریب خوبی مقدار گذردهی و در نتیجه ضریب شکست پلازما به صفر نزدیک خواهد شد. به‌طور کلی، تعامل موج الکترومغناطیسی با پلازما در حالتی که فرکانس تحریک پلازما و فرکانس موج برابر باشند، باعث ایجاد تأثیرات پیچیده و تعاملات وابسته به شرایط خاص پلازما می‌شود که می‌تواند موضوع ارزشمندی برای پژوهش‌های آینده باشد.

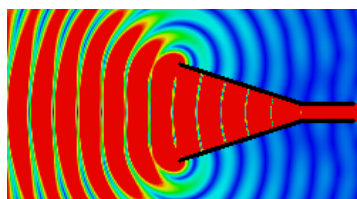
## معرفی ساختار آنتن پیشنهادی

پس از آشنایی با مشخصات محیط پلازما در بخش دوم، در این بخش، مبتنی بر خاصیت دی‌الکتریک پلازما، ساختار جدیدی از ترکیب آنتن شیپوری هرمی و ساختارهای پلاسمایی ارائه می‌شود که قابلیت هدایت پرتو تشعشعی دارد. ساختار آنتن پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. آنتن شیپوری هرمی استاندارد در باند  $X$  (۸-۱۲ GHz)، که دهانه روزنه آن در صفحه  $x-y$  و محور آنتن در امتداد محور  $z$  قرار گرفته است، تشعشع کننده اصلی در این ساختار می‌باشد. بهره آنتن شیپوری در فرکانس ۱۰ GHz برابر ۱۶ dBi، نسبت گلبگ فرعی به اصلی (SLL) برابر ۱۰ dB و مقدار عرض پرتو نیم‌توان (HPBW) برابر  $۲۶/۸^\circ$  است. این آنتن به‌عنوان تغذیه تیغه‌های پلاسمایی استفاده شده است که در طراحی آن موجبر WR90 به کار رفته است. ابعاد دهانه آنتن نیز برابر با  $۸۴ \times ۶۰$  mm می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، اضلاع آنتن شیپوری در صفحات  $H$ - و  $E$ -plane با استفاده از تیغه‌های پلاسمایی، در دو امتداد عمود بر لبه‌های روزنه و نیز زاویه بازشدگی  $۱۵^\circ$  درجه نسبت به صفحات عمود بر روزنه گسترش یافته‌اند. زاویه  $۱۵^\circ$  درجه یک انتخاب اولیه است و در بخش‌های بعدی در خصوص مقدار این زاویه بررسی‌های بیشتری انجام خواهد شد. ضخامت و طول هر تیغه پلاسمایی به ترتیب برابر ۵ mm و ۱۵۰ mm است درحالی‌که عرض هر صفحه برابر با عرض دهانه آنتن شیپوری است.

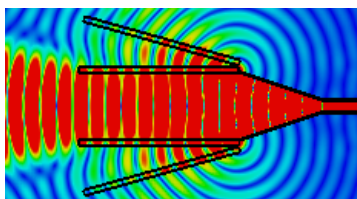
پلاسمایی روشن، سه حالت اصلی از خاموش و روشن شدن تیغه‌ها در ادامه به تفکیک معرفی شده و مشخصات تشعشی آنتن در هر حالت، شبیه‌سازی شده و نتایج آن مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد.

### تحریک یا عدم تحریک هم‌زمان کلیه تیغه‌های پلاسمایی

توزیع میدان الکتریکی آنتن شیپوری، در حالتی که کلیه تیغه‌های پلاسمایی خاموش هستند، در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که امواج الکترومغناطیسی به صورت کروی از روزنه این آنتن در فضا منتشر می‌شوند و وجود تیغه‌های پلاسمایی خاموش، تأثیری بر توزیع میدان الکتریکی ساطع شده از دهانه آنتن ندارد زیرا قابلیت گذردهی پلاسمای خاموش با خلأ یکسان است. با تحریک هم‌زمان همه تیغه‌های پلاسمایی، همان‌گونه که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است، امواج الکترومغناطیسی به صورت امواج شبه صفحه‌ای از آنتن منتشر می‌شوند. تبدیل امواج کروی به امواج شبه صفحه‌ای در حالت روشن شدن تیغه‌های پلاسمایی به دلیل جبران خطای فاز امواج کروی به واسطه حضور ماده دی‌الکتریک با ضریب دی‌الکتریک کوچکتر از ۱ می‌تواند عامل افزایش مقدار بهره در آنتن شود حال آنکه ابعاد فیزیکی روزنه تشعشی ثابت و بدون تغییر بوده است.



A



B

شکل ۲- توزیع میدان الکتریکی در آنتن پیشنهادی در دو حالت: (الف) خاموش بودن کلیه تیغه‌های پلاسمایی، (ب) روشن بودن کلیه تیغه‌های پلاسمایی.

**Fig. 2.** Distribution of the electric field in the proposed antenna in two modes : (a) all the plasma slabs are OFF (b) all the plasma slabs are ON.

مقایسه بهره تشعشی آنتن پیشنهادی، در دو حالت تحریک یا عدم تحریک هم‌زمان تیغه‌های پلاسمایی در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که در صورت تحریک هم‌زمان همه تیغه‌های پلاسمایی، مقدار بهره، SLL و نیز HPBW آنتن در فرکانس ۱۰ GHz به ترتیب برابر با  $16.1/8$  dBi،  $16/6$  dB و  $21^{\circ}$  است و این به معنای

مبتنی بر طرح پیشنهادی، در ادامه این پژوهش، مشخصات تشعشی آنتن در حالت‌های مختلف روشن و خاموش بودن تیغه‌های مختلف پلاسمایی، تأثیر طول و زاویه تیغه‌ها و فرکانس پلاسمای هر تیغه به تفکیک مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

### بررسی مشخصات تشعشی آنتن پیشنهادی

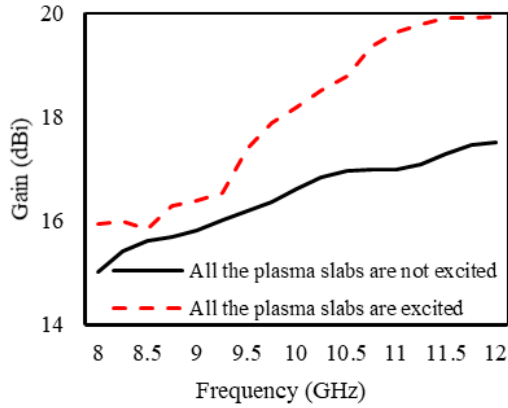
پس از معرفی ساختار کلی آنتن پیشنهادی، در این بخش مشخصات تشعشی آنتن در حالت‌های مختلف تحریک تیغه‌های پلاسمایی بررسی می‌شوند. با توجه به امکان روشن و خاموش کردن تیغه‌های پلاسمای کنترل مقدار فرکانس پلاسمای در هر تیغه، در این بخش دو ساختار کلی از آنتن مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. در ساختار اول که هدایت پرتو تشعشی مبتنی بر خاموش و روشن شدن برخی از تیغه‌های پلاسمایی شکل می‌گیرد، مقدار فرکانس پلاسمای در همه تیغه‌های پلاسمایی ثابت است و اثرات مربوط به خاموش و روشن شدن تیغه‌ها بر مشخصات تشعشی آنتن و نیز جهت پرتو تشعشی آنتن شیپوری بررسی می‌شود. در این ساختار، مقدار فرکانس پلاسمای در هر تیغه پلاسمایی روشن برابر با ۸ GHz و مقدار فرکانس برخورد در آن برابر با ۱/۸ GHz فرض شده است. در این حالت مقدار گذردهی نسبی پلاسمای طبق رابطه (۳) تقریباً برابر  $0.36$  خواهد شد. انتخاب این مقادیر به جهت انطباق هرچه بیشتر ساختار شبیه‌سازی شده با عناصر پلاسمایی موجود در بازار است تا در آینده، در صورت تحقق و پیاده‌سازی، نتایج حداقل تفاوت را با شبیه‌سازی‌ها داشته باشند.

در ساختار دوم که صرفاً از چهار تیغه پلاسمایی عمود بر روزنه آنتن استفاده می‌شود، اثرات ناشی از تغییرات مقدار فرکانس پلاسمای در هر تیغه بر کنترل جهت پرتو تشعشی بررسی می‌شود. کنترل مقدار فرکانس پلاسمای در تیغه‌ها با استفاده از کنترل مقدار جریان در مدار تحریک هر تیغه امکان‌پذیر است.

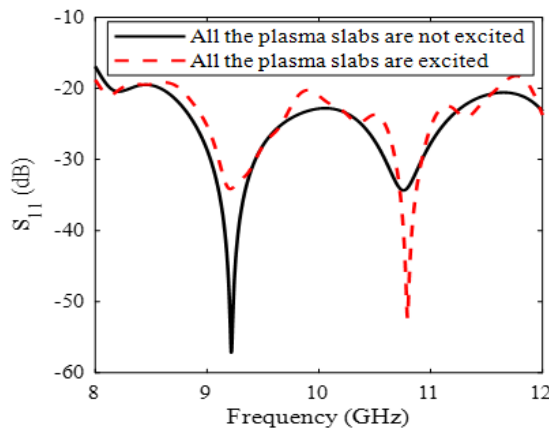
### مشخصات تشعشی آنتن پیشنهادی با خاموش و روشن شدن تیغه‌های پلاسمایی

همان‌طور که در مقدمه این بخش اشاره شد، در این ساختار، مقدار فرکانس پلاسمای در تیغه‌های پلاسمایی تحریک شده برابر با ۸ GHz و مقدار فرکانس برخورد در آن‌ها برابر با ۱/۸ GHz است. در چنین حالتی، با توجه به آن که فرکانس کاری مورد نظر آنتن شیپوری برابر ۱۰ GHz است، تیغه‌های پلاسمایی به‌عنوان دی‌الکتریک در امتداد آنتن شیپوری قرار می‌گیرند. با توجه به وجود هشت تیغه در اطراف آنتن شیپوری، در این قسمت تأثیر روشن و خاموش شدن تیغه‌ها بر مشخصات تشعشی آنتن شیپوری بررسی می‌شوند. برای درک بهتر عملکرد آنتن در حالت‌های مختلف تیغه‌های

تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی برای هدایت پرتو و کنترل بهره در آنتن شیپوری، تطبیق امپدانس آسیبی نخواهد دید.



(A)



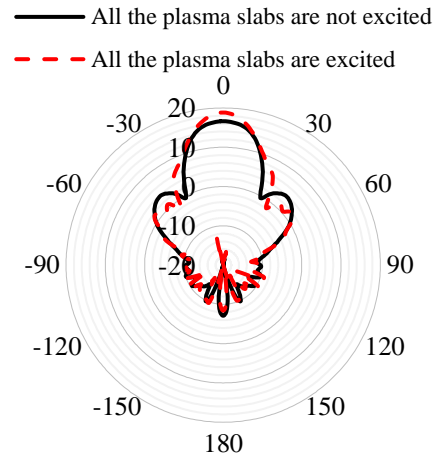
(B)

شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخصات آنتن پیشنهادی در دو حالت تحریک و عدم تحریک کلیه تیغه‌های پلاسمایی: (الف) نمودار بهره تشعشی، (ب) نمودار تطبیق امپدانس.

**Fig. 4.** Comparison of the simulated radiation characteristics of the proposed antenna in different modes of excited and unexcited plasma slabs: (a) radiation gain (b) impedance matching.

به‌طور خلاصه، تاکنون تأثیر تحریک یا عدم تحریک هم‌زمان کلیه تیغه‌های پلاسمایی بر پارامترهای تشعشی آنتن پیشنهادی بررسی شدند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که تحریک هم‌زمان کلیه تیغه‌های پلاسمایی می‌تواند سبب بهبود بهره تشعشی آنتن شود بدون اینکه اثر نامطلوبی بر مشخصه تطبیق امپدانس آن داشته باشند. بنابراین، با توجه به امکان روشن و خاموش شدن سریع تیغه‌های پلاسمایی، آنتن حاصل بین دو حالت بهره بیشتر (عرض پرتو کمتر) و حالت بهره کمتر (عرض پرتو بیشتر) قابلیت سوئیچ شدن دارد. بررسی تأثیر تیغه‌های پلاسمایی روشن و خاموش بر بازدهی کل آنتن نشان می‌دهد، هرگاه همه تیغه‌های پلاسمایی روشن هستند بازده کل به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

حدود ۲/۸ dB بهبود در مقدار بهره تشعشی آنتن شیپوری با تیغه‌های پلاسمایی تحریک‌شده نسبت به بهره آنتن شیپوری بدون تیغه است.



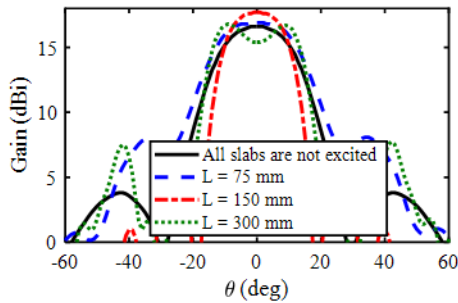
شکل ۳- مقایسه بهره تشعشی شبیه‌سازی‌شده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰ GHz در دو حالت عدم تحریک (خط متد) و تحریک کلیه تیغه‌های پلاسمایی (خط چین).

**Fig. 3.** Comparison of the simulated radiation gain of the proposed antenna in E-plane at the frequency of 10 GHz in the cases of the unexcited (solid line) and the excited plasma slabs.

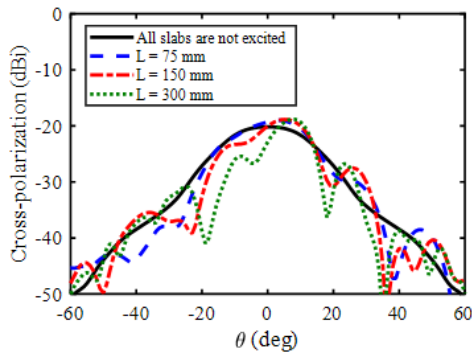
ذکر این نکته حائز اهمیت است که این میزان افزایش بهره به سادگی با افزایش طول آنتن شیپوری قابل حصول است؛ اما مزیت استفاده از پلاسمای این است که بهره آنتن پیشنهادی بین این دو مقدار بهره تشعشی، قابلیت سوئیچ شدن دارد. به‌علاوه، در چنین حالتی مقدار SLL نسبت به آنتن شیپوری حدود ۴ dB بهبود یافته است.

نمودار تغییرات بهره شبیه‌سازی‌شده برای آنتن حاصل در بازه فرکانسی ۸-۱۲ GHz در شکل ۴ (الف) ارائه شده است. در این نمودار، خط سیاه توپر، شاخص تغییرات بهره در آنتنی است که کلیه تیغه‌های پلاسمایی در آن خاموش هستند و خط چین مربوط به آنتنی است که کلیه تیغه‌های پلاسمایی تحریک شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که به‌طور کلی با تحریک همه تیغه‌های پلاسمایی، مقدار بهره آنتن در بازه فرکانسی مورد بررسی افزایش داشته است. با هدف بررسی اثرات تیغه‌های پلاسمایی بر تطبیق امپدانس آنتن شیپوری، در شکل ۴ (ب) نمودار تغییرات پارامتر  $S_{11}$  آنتن پیشنهادی، در دو حالت تحریک هم‌زمان همه تیغه‌ها و عدم تحریک آن‌ها نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که در آنتن شیپوری تشعشع کننده اصلی، تطبیق امپدانس در بازه فرکانسی موردنظر به‌صورت کامل برقرار است. نتایج نشان می‌دهد که تحریک یا عدم تحریک تیغه‌های پلاسمایی اثر قابل‌توجهی بر مشخصه تطبیق امپدانس آنتن ندارد و این بدان معناست که در صورت استفاده از

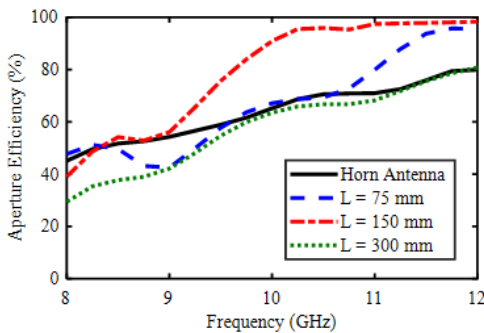
با استفاده از تیغه‌های پلاسمایی با طول‌های کوچکتر یا بزرگتر بهره آنتن از این مقدار بهینه کمتر خواهد بود.



(A)



(B)



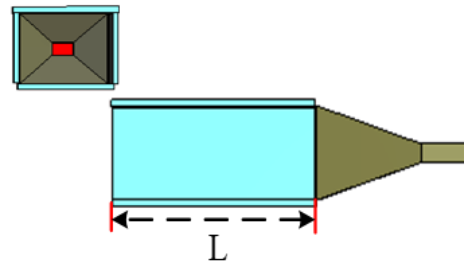
(C)

**شکل ۶-** (الف) مقایسه اثر طول تیغه‌های پلاسمایی بر بهره تشعشی شبیه‌سازی شده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰ GHz در حالتی که کلیه تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه تحریک شده و هر چهار تیغه پلاسمایی مورب خاموش می‌شوند؛ (ب) نمودار اثرات طول تیغه‌های پلاسمایی بر قطبش متقاطع؛ (ج) مقایسه تغییرات بازدهی روزنه آنتن با تغییر طول تیغه‌های پلاسمایی.

**Fig. 6.** (a) Comparison of the effect of the length of the plasma slabs on simulated E-plane radiation gain of the proposed antenna at 10 GHz, when all the perpendicular plasma slabs to the aperture are excited and four oblique plasma slabs are OFF, (b) the effect of the length of the plasma slabs on the cross polarization, (c) comparison of the effects of the length of plasma slabs on the aperture efficiency.

### تحریک چهار تیغه پلاسمایی عمود بر روزنه

در این قسمت، با هدف بررسی اثر تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه، چهار تیغه مورب، مطابق تصویر نشان داده شده در شکل ۵ خاموش می‌شوند. در این حالت، مقدار بهره تشعشی آنتن برابر با ۱۷/۷ dBi شده و پرتو اصلی آنتن در امتداد محور z، عمود بر دهانه روزنه است. به علاوه، نسبت گلبرگ فرعی به اصلی آنتن در این حالت برابر با ۱۰/۵ dB- است. این نتایج نشان می‌دهند که همان‌طور که انتظار می‌رود تقارن تیغه‌های پلاسمایی سبب افزایش بهره تشعشی آنتن شده و اثری بر جهت پرتو ندارد و میزان افزایش بهره آنتن در چنین حالتی، نسبت به آنتن شیپوری که همه تیغه‌های پلاسمایی در آن خاموش هستند برابر با ۱/۷ dB است.

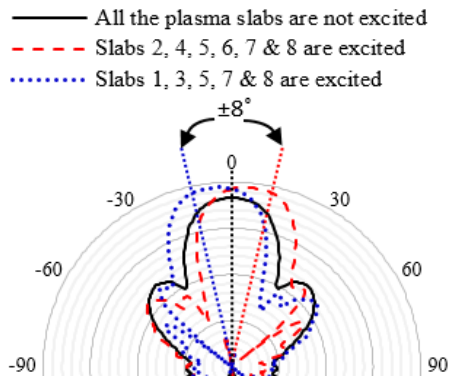


**شکل ۵-** ساختار آنتن پیشنهادی در حالتی که کلیه تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه تحریک شده و هر چهار تیغه پلاسمایی مورب خاموش می‌شوند.

**Fig. 5.** Structure of the proposed antenna when all perpendicular plasma slabs to the aperture are excited, and the four oblique plasma slabs are OFF.

به منظور ارزیابی میزان اثر این تیغه‌های پلاسمایی بر مقدار بهره آنتن، در شکل ۶ (الف)، نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک تأثیر طول تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه بر مشخصات تشعشی آنتن ارائه شده است. در این تحلیل، سه طول مختلف، شامل ۷۵، ۱۵۰، و ۳۰۰ میلی‌متر برای تیغه‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که چنانچه طول تیغه‌ها برابر ۷۵ mm باشد، مقدار بهره تشعشی برابر ۱۶/۹ dBi و چنانچه طول تیغه‌ها ۳۰۰ mm باشد، مقدار بهره برابر با ۱۵/۴ dBi می‌شود و این در حالی است که تیغه‌هایی با طول ۱۵۰ mm بهره‌ای معادل ۱۷/۷ dBi برای آنتن ایجاد می‌نموند. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که در هر سه مقدار طول تیغه‌ها، متناسب با افزایش طول تیغه نسبت گلبرگ فرعی به اصلی در آنتن به ترتیب از مقدار کمترین طول به بیشترین طول برابر با ۸/۸ dB-، ۱۰/۵- و ۹- می‌شود. به طور خلاصه از این تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه‌ای برای طول تیغه‌های پلاسمایی وجود دارد و افزایش یا کاهش این طول از مقدار بهینه سبب کاهش مقدار بهره تشعشی آنتن می‌شود زیرا طول مشخصی از تیغه پلاسمایی با ضریب دی‌الکتریک کوچکتر از ۱ باعث هم فاز شدن امواج در روزنه آنتن و در نتیجه بهره بهینه می‌شود.

مقایسه این دو نمودار نشان می‌دهد که پرتو تشعشعی خروجی از آنتن در هر دو حالت زاویه‌دار شده و دیگر در امتداد محور آنتن شیپوری نیست؛ زیرا زمانی که میدان توسط تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه آنتن شیپوری با میدان وسط روزنه هم‌فاز می‌شود، میدان در سمت تیغه‌های مورب با میدان وسط روزنه اختلاف فاز دارد. بنابراین، طبق اصل هویگنس، میدان راه‌دور نهایی ناشی از میدان‌های روزنه آنتن مایل شده و پرتو آنتن نسبت به بردار عمود بر روزنه آنتن زاویه‌دار خواهد بود. واضح است که زاویه پرتو تابع طول، زاویه، و همچنین ضریب دی‌الکتریک تیغه‌های پلاسمایی است. بررسی دقیق‌تر این موضوع با مقایسه بهره تشعشعی هر دو حالت امکان‌پذیر است. در شکل ۸، بهره تشعشعی این دو حالت با بهره تشعشعی آنتنی که کلیه تیغه‌های پلاسمایی در آن خاموش هستند، مقایسه شده است.



شکل ۸- مقایسه بهره تشعشعی شبیه‌سازی شده از آنتن پیشنهادی در صفحه E در فرکانس ۱۰ GHz در سه حالت: (۱) خاموش کردن همه تیغه‌های پلاسمایی (خط مشکی ممتد) ... (۲) خاموش کردن تیغه‌های ۱ و ۳ (خط چین)، (۳) خاموش کردن تیغه‌های ۲ و ۴ (نقطه چین).

**Fig. 8.** Comparison of the simulated radiation gain of the proposed antenna in the E-plane at the frequency of 10 GHz and in three modes: (a) all the plasma slabs are OFF (the solid black line), (b) the slabs 1 and 3 are OFF (dashed line), (c) the slabs 2 and 4 are OFF (dotted line).

این نمودار نشان می‌دهد که در این دو حالت، مبتنی بر اینکه تیغه پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه در کدام جهت تحریک شده است، الگوی تشعشعی میدان الکتریکی آنتن به اندازه ۸ درجه به سمت مقابل متمایل شده است. به علاوه، در این دو حالت، مقدار بهره تشعشعی آنتن برابر با ۱۹/۶ dBi است که مبین ۳/۶ dB افزایش در مقدار بهره نسبت به آنتنی است که کلیه تیغه‌های پلاسمایی آن تحریک نشده هستند. با توجه به اینکه امکان ایجاد چنین حالتی برای آنتن در هر دو صفحه E و H وجود دارد، امکان تغییر جهت پرتو در هر دو صفحه به اندازه  $\pm 8^\circ$  درجه وجود دارد. به طور خلاصه می‌توان گفت در صورت تحریک ۶ تیغه پلاسمایی

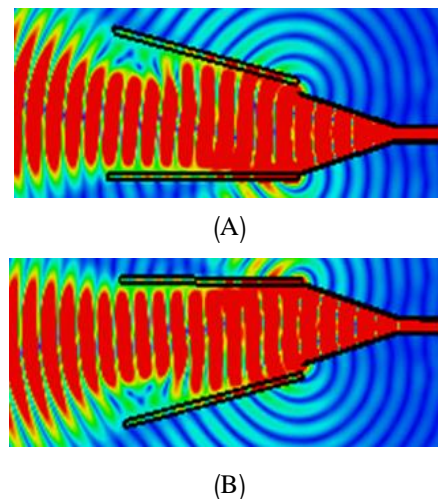
در شکل ۶ (ج)، نمودار تغییرات بازدهی روزنه آنتن ( $\eta$ ) در بازه فرکانسی، برای مقادیر مختلف طول تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه نشان داده شده و نتایج آن با نتایج حاصل از بازدهی روزنه آنتن شیپوری بدون تیغه پلاسمایی مقایسه شده است. در محاسبه مقدار بازدهی روزنه، از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

$$\eta = G\lambda^2/4\pi A \quad (7)$$

در این رابطه، A مساحت فیزیکی روزنه،  $\lambda$  طول موج در فرکانس کاری آنتن و G مقدار بهره آنتن است. مبتنی بر رابطه (۷) و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقدار بهره تشعشعی در فرکانس مرکزی، که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است، به دلیل ثابت ماندن مساحت روزنه، افزایش مقدار بهره نسبت به بهره آنتن شیپوری در فرکانس ۱۰ GHz، سبب افزایش بازدهی روزنه آنتن می‌شود و این نتیجه در نمودارهای ارائه شده در شکل ۶ (ج) قابل مشاهده است.

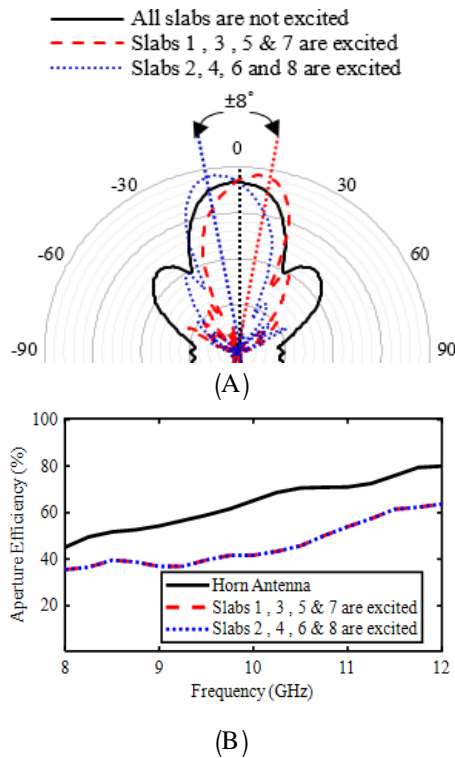
### عدم تحریک دو تیغه از هشت تیغه پلاسمایی

در این بخش، اثرات عدم تحریک ۲ تیغه پلاسمایی از کل ۸ تیغه پلاسمایی به کار رفته در ساختار آنتن، بر مشخصات تشعشعی کل آنتن بررسی می‌شود. به عنوان نمونه، در ساختار آنتن، با فرض تحریک کامل همه تیغه‌های پلاسمایی، ابتدا دو تیغه شماره ۱ و ۳ را خاموش کرده و مشخصات تشعشعی و نمودار توزیع میدان آنتن استخراج می‌شوند و در مرحله دوم، دو تیغه شماره ۲ و ۴ خاموش شده و سایر تیغه‌ها تحریک شده باقی می‌مانند. نتایج حاصل از مقایسه توزیع دامنه میدان الکتریکی این دو حالت در شکل ۷ نشان داده شده است



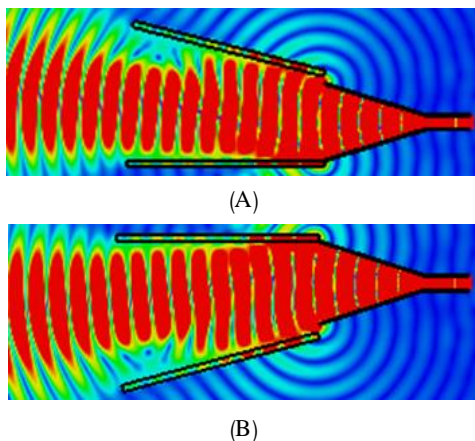
شکل ۷- دامنه توزیع میدان الکتریکی در آنتن پیشنهادی: (الف) خاموش بودن دو تیغه پلاسمایی ۲ و ۴، (ب) خاموش بودن دو تیغه پلاسمایی ۱ و ۳.

**Fig. 7.** Snapshots of distribution of the electric field in the proposed antenna: (a) the slabs 2 and 4 are OFF, (b) the slabs 1 and 3 are OFF.



**شکل ۱۰- (الف)** مقایسه بهره تشعشی شبیه‌سازی شده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰ GHz در سه حالت: (۱) خاموش کردن همه تیغه‌های پلاسمایی (خط پیوسته)، (۲) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ تحریک شده و سایر تیغه‌ها خاموش هستند (خط چین)، (۳) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۲، ۴، ۶، ۸ و ۹ تحریک شده و سایر تیغه‌های پلاسمایی خاموش هستند (نقطه‌چین). (ب) مقایسه تغییرات بازدهی روزنه آنتن با تغییر حالت‌های تحریک تیغه‌های پلاسمایی.

**Fig. 10.** (a) Comparison of the simulated E-plane radiation gain at the frequency of 10 GHz in three modes: 1) all plasma slabs are OFF (solid line), 2) the slabs 1, 3, 5 and 7 are excited and the others are OFF (dashed line), 3) the slabs 2, 4, 6 and 8 are excited and the others are OFF (dotted line), (b) variations of the aperture efficiency of the antenna at different operating modes of plasma slabs.



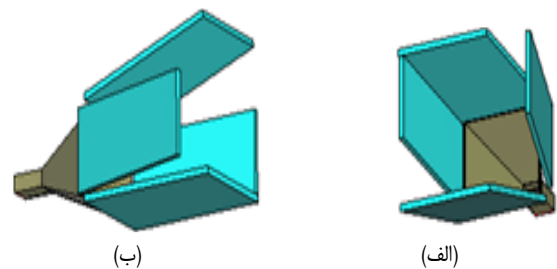
**شکل ۱۱- توزیع میدان الکتریکی در آنتن پیشنهادی:** (الف) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریک شده و سایر تیغه‌ها خاموش هستند، (ب) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ تحریک شده و سایر تیغه‌های پلاسمایی خاموش هستند.

**Fig. 11.** Distribution of the electrical field in the proposed antenna: (a) the plasma slabs 1, 3, 5 and 7 are excited and the others are OFF, (b) the slabs 2, 4, 6 and 8 are excited and the others are OFF.

متناسب با شماره‌هایی که در این بخش معرفی شدند، الگوی تشعشی میدان الکتریکی آنتن جهت‌دار شده و مقدار بهره آنتن تا ۳/۶ dB بهبود می‌یابد.

### تحریک دو تیغه عمود و دو تیغه مورب از هشت تیغه پلاسمایی

یکی دیگر از حالت‌های امکان‌پذیر برای آنتن پیشنهادی، حالتی است که در آن ۴ تیغه پلاسمایی، مطابق تصویر نشان داده شده در شکل ۹، تحریک شده و ۴ تیغه دیگر خاموش باشند. در شکل ۱۰ (الف)، الگوی تشعشی میدان الکتریکی آنتن در دو حالت زیر با یکدیگر و نیز با آنتنی که کلیه تیغه‌های پلاسمایی در آن خاموش هستند، مقایسه شده است: (۱) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریک شده و سایر تیغه‌ها خاموش هستند. (۲) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ تحریک شده و سایر تیغه‌های پلاسمایی خاموش هستند. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که در حالت اول، الگوی تشعشی میدان الکتریکی آنتن ۸ درجه به سمتی که تیغه‌های مورب تحریک شده‌اند و در زاویه  $\varphi = 45^\circ$  درجه تغییر جهت داده و مقدار بهره آنتن نیز برابر 5/18 dBi است که به معنای 2 dB بهبود در بهره تشعشی آنتن نسبت به حالتی است که همه تیغه‌های پلاسمایی خاموش هستند. افزایش بهره آنتن به دلیل هم‌فاز شدن موج کروی و زاویه دار شدن آن نیز با توجه به اصل هویگنس قابل توجیه است. به‌علاوه در حالت دوم نیز الگوی تشعشی آنتن به‌صورت کاملاً متقارن نسبت به حالت قبل و به مقدار ۸ درجه به سمت تیغه‌های مورب متمایل شده و در زاویه  $\varphi = 45^\circ$  [درجه بهره تشعشی برابر 5/18 dBi است.

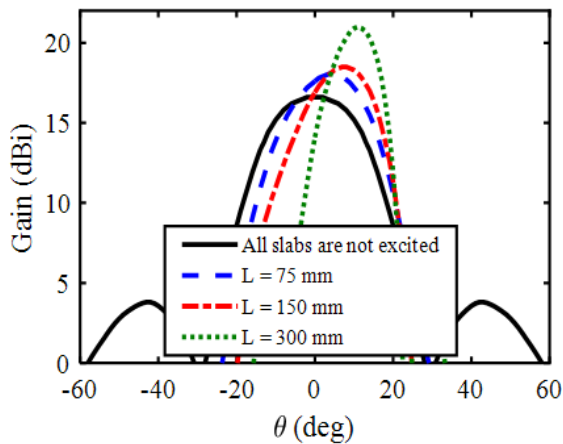


**شکل ۹- ساختار آنتن پیشنهادی در دو حالت:** (الف) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریک شده و سایر تیغه‌ها خاموش هستند؛ (ب) تیغه‌های پلاسمایی شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ تحریک شده و سایر تیغه‌های پلاسمایی خاموش هستند.

**Fig. 9.** The proposed antenna structure in two modes: (a) the slabs 1, 3, 5 and 7 are excited and the others are OFF, (b) the slabs 2, 4, 6 and 8 are excited and the others are OFF.

مقایسه تغییرات بازدهی روزنه آنتن برحسب فرکانس برای این دو حالت، همان‌گونه که در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شده است، بیان می‌دارد که مقدار بازدهی روزنه در هر دو حالت یکسان است. عطف به رابطه (۷)، به دلیل افزایش سطح مقطع روزنه، مقدار بازدهی روزنه آنتن در این دو حالت، کمتر از مقدار بازدهی روزنه آنتن شیپوری است.

حالت، از طول تیغه‌های کوچک‌تر به طول تیغه‌های بزرگ‌تر به ترتیب برابر با  $۲۴/۶$ ،  $۱۸/۸$ ،  $۱۳/۹$  - در واحد dB می‌باشند. به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول تیغه‌های پلاسمایی در این حالت، با ثابت ماندن زاویه تیغه‌های مورب سبب بهبود مقدار بهره تشعشی و افزایش زاویه هدایت آنتن شده‌اند.

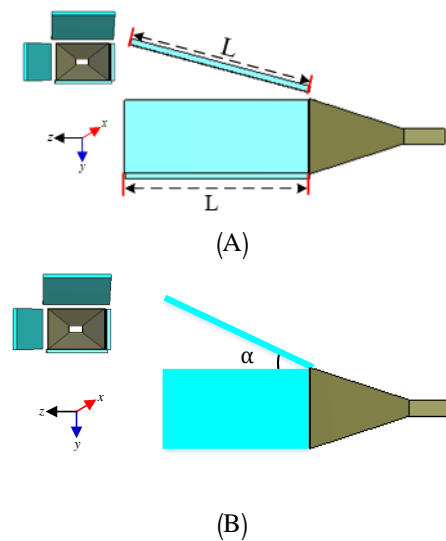


شکل ۱۳- مقایسه اثر طول تیغه‌های پلاسمایی بر بهره تشعشی شبیه‌سازی شده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰ GHz در حالتی که تیغه‌های پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریک شده و سایر تیغه‌ها خاموش هستند و زاویه بازشدگی ۱۵ درجه است.

**Fig. 13.** Comparison of the effect of the slab lengths on the simulated radiation gain in E-plane of the proposed antenna at 10 GHz, when the slabs 1, 3, 5 and 7 are excited and the others are OFF and the opening angle is 15 degrees.

افزایش مقدار زاویه بازشدگی تیغه‌های مورب تحریک‌شده، جهت پرتو آنتن را تا ۱۲ درجه حول محور اصلی تشعشی هدایت‌پذیر می‌کند و این هدایت پرتو برای دو مقدار زاویه بازشدگی  $۳/۵$  و  $۶۰$  درجه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. دلیل هدایت جهت پرتو در این ساختار نیز با در نظر گرفتن هر نقطه روی جبهه موج به‌عنوان منبع و محاسبه میدان نهایی از جمع میدان نقاط فرضی با اصل هویگنس توجیه می‌شود. در این شکل شماره تیغه‌های تحریک‌شده نیز مشخص است. این نمودار مبین  $\pm ۱۲$  درجه هدایت‌پذیری در امتداد محور آنتن پیشنهادی است. تغییرات جزئی‌تر اثرات زاویه بازشدگی تیغه‌های مورب در جهت پرتو اصلی آنتن در شکل ۱۵ (الف) نشان داده شده است. در این نمودار، زاویه بازشدگی تیغه‌های مورب بین  $۰$  تا  $۸۰$  درجه (محور افقی) تغییر کرده است و نمودار نشان می‌دهد که با استفاده از این مکانیسم جهت پرتو تشعشی اصلی آنتن (محور عمودی) تا ۱۲ درجه قابل هدایت است. لازم به ذکر است که افزایش زاویه بازشدگی تا  $۵۰$  درجه می‌تواند سبب هدایت بیشتر پرتو شود و پس از آن اثر قابل توجهی بر جهت پرتو تشعشی نخواهد داشت زیرا هر چه تیغه‌های مورب زاویه بیشتری نسبت به سطح افق داشته باشد، موج خارج شده از دهانه آنتن شیپوری به سطح مقطع کوچکتری از تیغه‌های

نمایی از توزیع دامنه میدان الکتریکی، در دو حالت معرفی شده از ساختار، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به قابلیت بالقوه‌ای که این حالت از آنتن در هدایت پرتو تشعشی دارد، در ادامه این بخش، دو تحلیل پارامتری مستقل روی طول تیغه‌های پلاسمایی و زاویه بازشدگی تیغه‌های مورب، مطابق شکل ۱۲، انجام شده و نتایج آن بر مشخصات تشعشی آنتن ارزیابی می‌شوند. در ادامه، به‌عنوان گام دوم، تحلیل پارامتری اثرات زاویه بازشدگی ( $\alpha$ ) تیغه‌های پلاسمایی مورب، با ثابت در نظر گرفتن طول تیغه‌ها برابر با ۱۵۰ mm، بر مشخصات تشعشی آنتن شکل ۱۲ ارائه می‌شود.



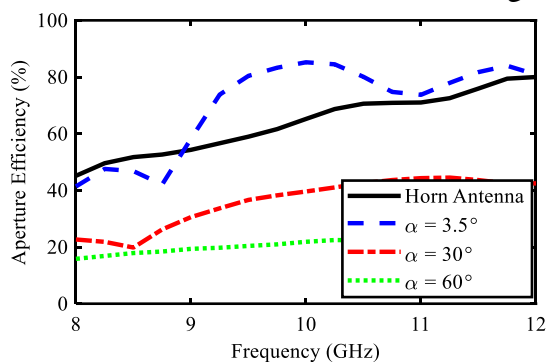
شکل ۱۲- تحلیل پارامتری بررسی ابعاد تیغه‌های پلاسمایی در آنتن پیشنهادی در حالتی که تیغه‌های پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریک‌شده و سایر تیغه‌ها خاموش هستند: (الف) تغییر طول تیغه‌ها، (ب) تغییر زاویه تیغه‌های پلاسمایی مورب.

**Fig. 12.** Parametric analysis of the slab configuration when the slabs 1, 3, 5 and 7 are excited and the other slabs are OFF: (a) variations of the slab lengths, (b) variations of the angle of the oblique slabs.

در شکل ۱۳، اثرات افزایش یا کاهش طول هر چهار تیغه پلاسمایی، با ثابت ماندن زاویه بازشدگی تیغه‌های مورب در مقدار ۱۵ درجه، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که چنانچه طول تیغه‌های پلاسمایی برابر  $L = ۷۵$  mm باشد، در فرکانس ۱۰ GHz پرتو تشعشی اصلی آنتن با بهره ۱۸/۱ dBi به‌اندازه ۵ درجه در صفحه  $\varphi = 45^\circ$  هدایت می‌شود؛ درحالی‌که اگر از تیغه‌های پلاسمایی با طول  $L = ۱۵۰$  mm استفاده شود، پرتو اصلی با مقدار بهره ۱۸/۵ dBi به‌اندازه ۸ درجه در  $\varphi = 45^\circ$  درجه هدایت می‌شود. افزایش بیشتر طول تیغه‌های پلاسمایی به مقدار  $L = ۳۰۰$  mm، سبب تغییر در بهره تشعشی و حصول مقدار بهره ۲۱ dBi در زاویه ۱۱ درجه در همان صفحه خواهد شد. به‌علاوه، نسبت گلبیگ فرعی به اصلی در هر سه

هدایت شده باشد. در شکل ۱۵ (ب) نمودار تغییرات بهره پرتو هدایت شده برحسب زاویه بازشدگی نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش مقدار زاویه بازشدگی تا زاویه  $\alpha = 3.5^\circ$ ، مقدار بهره آنتن افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد و این زاویه حدی تابع مقدار عرض پرتو نیم توان آنتن شیپوری است و توجیه آن با اصل هویگنس امکان‌پذیر است.

اثرات ناشی از تغییرات زاویه بازشدگی تیغه‌های پلاسمایی بر بازدهی روزنه آنتن و مقایسه آن با بازدهی روزنه آنتن شیپوری در شکل ۱۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که افزایش زاویه بازشدگی تیغه‌های پلاسمایی به منزله افزایش سطح مقطع روزنه در رابطه (۷) است. در این نمودار، بیشترین مقدار بازدهی روزنه آنتن در فرکانس ۱۰ GHz زمانی حاصل می‌شود مقدار  $\alpha = 3.5^\circ$  است و در سایر مقادیر، مقدار بازدهی روزنه نیز نسبت به آنتن شیپوری کاهش یافته است.



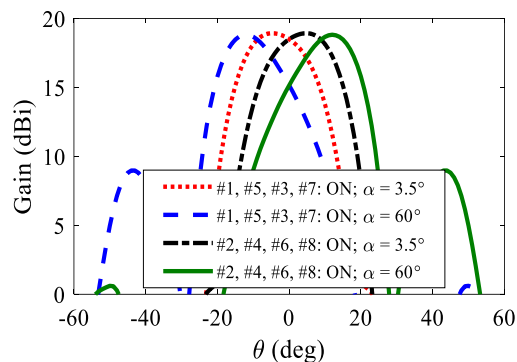
شکل ۱۶- تغییرات بازدهی روزنه نسبت به زاویه تیغه‌های پلاسمایی.

Fig. 16. Variations of the aperture efficiency versus the angle of the plasma slabs.

### مشخصات تشعشعی آنتن پیشنهادی با کنترل فرکانس پلازما در تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه

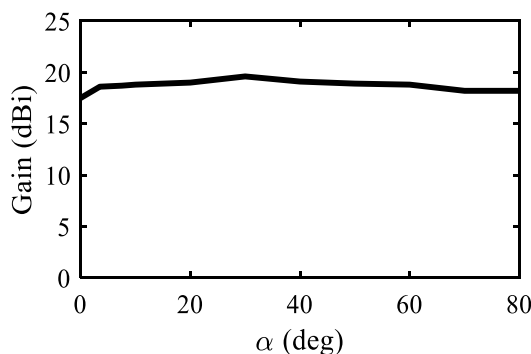
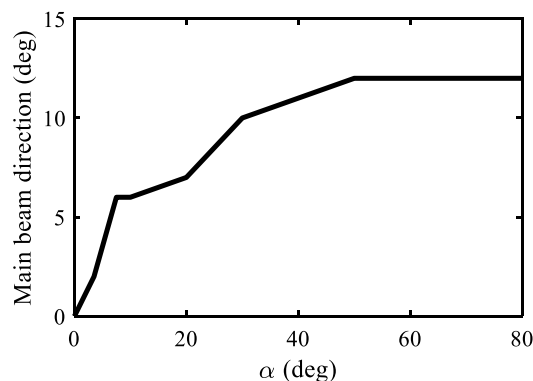
پس از بررسی‌های انجام‌شده در بخش قبل در خصوص اثرات خاموش و روشن شدن تیغه‌های پلاسمایی بر مشخصات تشعشعی آنتن، در این فصل اثرات مقدار فرکانس پلازما بر مشخصات تشعشعی آنتن بررسی و ارزیابی می‌شوند. با توجه به تنوع حالت‌های موجود در آنتن که به دلیل قابلیت روشن و خاموش شدن تیغه‌های پلاسمایی فراهم است، در این بخش، اثرات تغییر فرکانس پلازما تنها بر یک حالت از آنتن ارزیابی می‌شود؛ حال آن‌که امکان کنترل این مقدار در سایر حالت‌های بررسی شده در قسمت‌های قبل نیز وجود دارد. در این راستا، حالتی از آنتن در نظر گرفته می‌شود که مطابق شکل ۱۷ چهار تیغه پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه تحریک شده‌اند و چهار تیغه مورب خاموش هستند. شماره تیغه‌های پلاسمایی تحریک شده عبارت‌است از: ۲، ۳، ۶ و ۷.

دی‌الکتریک پلاسمایی برخورد می‌کند. این افزایش زاویه از مقداری مشخص به بعد تأثیری بر جهت‌گیری پرتو آنتن نداشته و مقدار آن ثابت می‌ماند اما مقدار بهره تشعشعی آنتن کمتر می‌شود.



شکل ۱۴- مقایسه اثر زاویه بازشدگی تیغه‌های پلاسمایی مورب بر بهره تشعشعی در صفحه E در فرکانس ۱۰ GHz.

Fig. 14. Comparison of the effect of the opening angle of the oblique slabs on the radiation gain in E-plane at the frequency of 10 GHz.



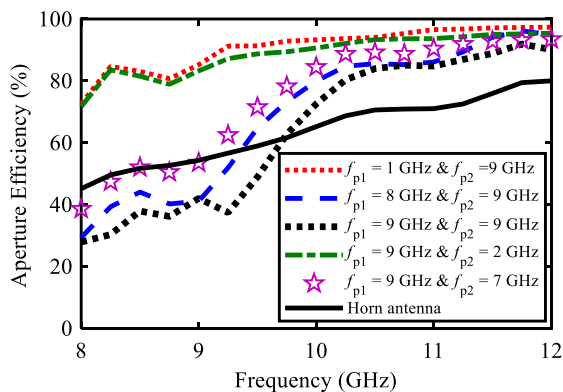
شکل ۱۵- اثرات زاویه بازشدگی تیغه‌های پلاسمایی مورب بر: (الف) جهت پرتو اصلی، (ب) مقدار بهره تشعشعی.

Fig. 15. The effects of the opening angle of the oblique slabs on: (a) main beam direction, (b) radiation gain.

استفاده از این ساختار برای هدایت پرتو، همانند سایر روش‌های هدایت پرتو می‌تواند عامل بروز تغییرات در مقدار بهره تشعشعی پرتو

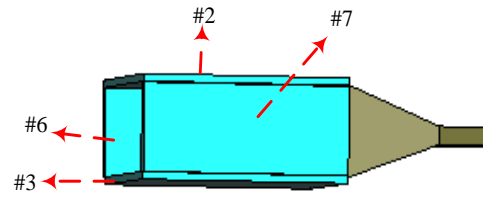
در این پژوهش، فرکانس پلاسما دو تیغه پلاسمایی در یک سوی آنتن، با شماره‌های ۲ و ۷، با یکدیگر یکسان و متفاوت از مقدار فرکانس پلاسمای دو تیغه روبرو با شماره‌های ۳ و ۶ در نظر گرفته می‌شود. کنترل فرکانس پلاسمای در این تیغه‌ها می‌تواند سبب هدایت پرتو در فضای حول محور آنتن شود و این قابلیت برای مقادیر فرکانس پلاسمای مختلف در تیغه‌ها در شکل ۱۸ (الف) نشان داده شده است. در این شکل،  $f_{p1}$  مربوط به فرکانس پلاسمای تیغه‌های ۲ و ۷ و  $f_{p2}$  معرف فرکانس پلاسمای تیغه‌های ۳ و ۶ است. کنترل مقدار فرکانس پلاسمای در تیغه‌ها بین ۱ GHz تا ۹ GHz می‌تواند امکان هدایت پرتو بین  $\pm 10^\circ$  درجه حول محور آنتن را فراهم آورد؛ زیرا با استفاده از رابطه (۳)، ضریب گذردهی نسبی در تیغه پلاسمایی که مثلاً فرکانس پلاسمای در آن برابر ۱ GHz است، بسیار نزدیک به یک (برابر ۰/۹۹) و در تیغه‌های پلاسمایی که فرکانس پلاسمای برابر ۹ GHz است برابر ۰/۴۳ می‌باشد. این اختلاف در ثابت گذردهی باعث ایجاد اختلاف فازهای متفاوت در تیغه‌های پلاسمایی می‌شود. به عبارت دیگر دو تیغه‌ای که ثابت گذردهی کمتری دارند موج را با سرعت بیشتری هدایت می‌کند. این امر باعث می‌شود قسمتی از موج بعد از عبور از تیغه‌های پلاسمایی از نظر فاز، عقب‌تر از سایر قسمت‌ها قرار گرفته و در زوایای افق و ارتفاع متفاوت از محور اصلی قرار بگیرد. چنانچه مقدار فرکانس پلاسمای در همه تیغه‌ها یکسان باشد، جهت پرتو اصلی در امتداد محور آنتن خواهد بود.

بررسی اثرات ناشی از تغییر فرکانس پلاسمای در تیغه‌ها بر قطبش متقاطع، مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۱۸ (ب)، نشان می‌دهد که تغییر فرکانس پلاسمایی تیغه‌ها می‌تواند تغییرات جزئی بر مشخصات تشعشی در این قطبش داشته باشد و عدم تقارن ناشی از تفاوت ثابت گذردهی در تیغه‌ها عامل این تغییرات است. با این وجود، به دلیل یکسان بودن ابعاد تیغه‌ها، این تغییرات جزئی و در محدوده قطبش آنتن شیپوری است. در حالت کلی، می‌توان ادعا نمود که تغییرات فرکانس پلاسمای در تیغه‌های پلاسمایی می‌تواند بر روی قطبش متقاطع به مقدار جزئی اثرگذار باشد.



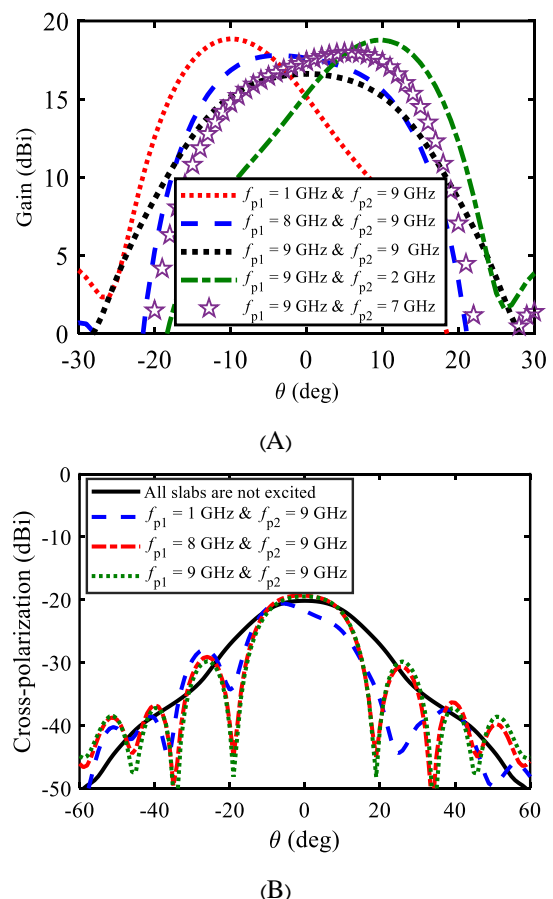
شکل ۱۹- نمودار تغییرات بازدهی آنتن با تغییر فرکانس پلاسمای در تیغه‌ها.

Fig. 19. Variations of the antenna efficiency at different plasma frequencies in the slabs.



شکل ۱۷- ساختار آنتن پیشنهادی و شماره تیغه‌های تحریک‌شده، در حالتی که تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه آنتن تحریک‌شده و هر چهار تیغه پلاسمایی مورب خاموش می‌شوند.

Fig. 17. The proposed antenna structure and the numbers of the slabs, when the perpendicular slabs on the aperture are all excited and all the oblique slabs are OFF.



شکل ۱۸- (الف) نمودار تغییرات مقدار بهره و جهت پرتو تشعشی آنتن در صفحه E، با کنترل مقدار فرکانس پلاسمای تیغه‌های پلاسمایی عمود بر دهانه آنتن شیپوری؛  $f_{p1}$  مربوط به فرکانس پلاسمای تیغه‌های ۲ و ۷ و  $f_{p2}$  مربوط به فرکانس پلاسمای تیغه‌های ۳ و ۶ است؛ (ب) نمودار اثرات ناشی از تغییر فرکانس پلاسمای بر قطبش متقاطع.

Fig. 18. (a) Variations of radiation gain and beam direction in E-plane, at different plasma frequencies in the slabs perpendicular to the horn aperture;  $f_{p1}$  is plasma frequency in the slabs 2 and 7,  $f_{p2}$  is the plasma frequency in the slabs 3 and 6; (b) the effects of the plasma frequency on the cross polarization.

مطالعات پارامتری انجام شده در زمینه عوامل مؤثر بر هدایت پرتو و کنترل مشخصات تشعشی این آنتن در فصل چهارم، در این فصل، مقایسه مختصری پیرامون تفاوت‌های این طرح با سایر آنتن‌های پلاسمایی معرفی شده در مراجع صورت گرفته و ویژگی‌های خاص آن به صورت برجسته معرفی می‌شوند. سپس، در ادامه، چالش‌های عملیاتی شدن طرح برای کاربردهای راداری و فضایی به اختصار بررسی خواهند شد.

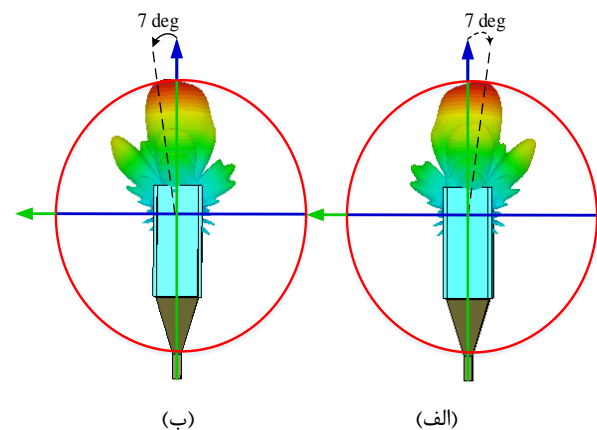
باتوجه به مقدمات بیان شده در فصل اول، عمده آنتن‌های دارای قابلیت هدایت پرتو مبتنی بر فناوری پلازما که تاکنون مورد پژوهش قرار گرفته‌اند، از خاصیت رسانایی پلازما برای هدایت پرتو استفاده نموده‌اند [۲۵-۲۲] و محدوده هدایت پرتو در آن‌ها یا تنها در صفحه پیرامونی آنتن (صفحه افقی) بوده [۲۱، ۲۲] و [۲۵]، یا بازه زاویه‌ای نسبتاً محدودی در صفحه ارتفاع را برای هدایت پرتو تشعشی پوشش می‌دهند [۲۴]. اخیراً پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از خاصیت دی‌الکتریک پلازما در ساختار آنتن منتشر شده‌اند [۱۷] و [۲۶، ۲۷]. اما، تنها مطالعه [۲۶] مدعی هدایت پرتو آنتن به واسطه استفاده از لنز استوانه‌ای دی‌الکتریک پلازما در ساختار آنتن است و هدایت جهت پرتو تشعشی در آن تنها در صفحه افقی حاصل می‌شود. با این توضیحات، می‌توان نوآوری‌های اصلی طرح پیشنهادی در این پژوهش را به صورت زیر خلاصه‌بندی نمود:

- ۱) ارائه طرحی نوین از آنتن شیپوری که به دلیل گسترش پلاسمایی در بخش انتهایی روزنه آنتن قابلیت هدایت پرتو و کنترل بهره پیدا می‌کند؛
- ۲) استفاده از خاصیت دی‌الکتریک پلازما در ایجاد قابلیت هدایت پرتو در صفحه ارتفاع؛
- ۳) افزایش گستره هدایت پرتو تا  $\pm 12^\circ$  درجه در صفحه ارتفاع نسبت به طرح ارائه شده در [۲۳] برای آنتن هلیکال.

بدون شک، برخورداری از قابلیت هدایت پرتو و کنترل مقدار بهره آنتن دو ویژگی بسیار ارزشمند برای کاهش هزینه سیستم‌های مخابراتی و مصرف بهینه توان الکتریکی در سیستم‌های ماهواره‌ای و راداری محسوب می‌شود. علیرغم قابلیت‌های منحصر به فرد، اثبات فناوری اغلب ادوات پلاسمایی به صورت آزمایشگاهی انجام شده و استفاده از آنها در کاربردهای واقعی نیازمند تحقیقات بیشتر در زمینه رفع محدودیت‌های پیاده‌سازی، استحکام مکانیکی و سبک‌سازی

بررسی نمودارهای بازدهی روزنه این آنتن در مقادیر مختلف فرکانس پلازما و مقایسه آن‌ها با نمودار بازدهی روزنه در آنتن شیپوری معمولی در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که افزایش میانگین فرکانس پلازما در تیغه‌ها سبب کاهش بازدهی روزنه آنتن شده و هرچه میانگین فرکانس پلازما کمتر باشد، بازدهی آنتن به مقدار بازدهی آنتن شیپوری معمولی نزدیک‌تر می‌شود. نتایج نشان داده‌اند که با کنترل مقدار فرکانس پلازما در تیغه‌های پلاسمایی، علاوه بر امکان کنترل مقدار بهره تشعشی، قابلیت هدایت جهت پرتو تشعشی در آنتن نیز وجود دارد.

تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بین خاموش و روشن کردن تیغه‌های پلاسمایی یا کنترل مقدار فرکانس پلازما در تیغه‌ها منوط به نحوه تحقق ساختار آنتن و امکانات کنترلی آن است. در تمام موارد بالا و شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌توان به این نکته توجه داشت که میزان بازدهی در فرکانس کاری ۱۰ GHz تقریباً با بازده آنتن تغذیه برابر است به این معنی که پلازما بازدهی آنتن تغذیه را تغییر نداده است.



**شکل ۲۰-** هدایت الگوی تشعشی میدان الکتریکی سه‌بعدی آنتن شیپوری با تیغه‌های پلاسمایی عمود بر روزنه آنتن در دو حالت: (الف) فرکانس پلازما در تیغه‌های پلاسمایی شماره ۲ و ۷ برابر ۹ GHz و در تیغه‌های پلاسمایی شماره ۳ و ۵ برابر ۷ GHz است. (ب) فرکانس پلازما در تیغه‌های پلاسمایی شماره ۲ و ۷ برابر ۷ GHz و در تیغه‌های پلاسمایی شماره ۳ و ۵ برابر ۹ GHz است و سایر تیغه‌ها خاموش هستند.

**Fig. 20.** Steering of the radiated E-field of the horn antenna using perpendicular plasma slabs in two following modes: (a) plasma frequency in the slabs 2 and 7 is 9 GHz, and in the slabs 3 and 5 is 7 GHz, (b) plasma frequency in the slabs 2 and 7 is 7 GHz, and in the slabs 3 and 5 is 9 GHz.

## تحلیل طرح پیشنهادی و چالش‌های عملیاتی

پیرو بررسی‌های انجام شده درخصوص طرح پیشنهادی آنتن شیپوری دارای قابلیت بازپیکربندی مبتنی بر فناوری پلازما و

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

- [1] A. Bali, M. R. Alizadeh Pahlavani, and H. Fayazi, "The design and fabrication of a plasma limiter to protect communication systems," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 10, no. 1, pp. 99-107, 2022, (in Persian).
- [2] T. Anderson, *Plasma Antennas*, Artech house, 2nd ed., 2021.
- [3] V. Kumar, "A review of plasma antennas," in *National Conference on Higher Education: Ways Ahead*, Delhi, India, 2014.
- [4] J. P. Rayner, A. P. Whichello, and A. D. Cheetham, "Physical characteristics of plasma antennas," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 32, no. 1, pp. 269-281, 2004, <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.826019>.
- [5] F. Sadeghikia, M. Talafi Noghani, and M. R. Simard, "Experimental study on the surface wave driven plasma antenna," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 70, no. 5, pp. 652-656, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.01.024>.
- [6] M. R. Dorbin, J. Rashed Mohassel, F. Sadeghikia, and H. Ja'afar, "Analytical estimation of the efficiency of surface-wave-excited plasma monopole antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 4, pp. 3040-3045, 2022, <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3139967>.
- [7] M. R. Dorbin, A. Karami Horestani, F. Sadeghikia, M. Talafi Noghani, and H. Ja'afar, "Analytical study on the resonance frequency of tunable surface-wave-excited plasma antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 9073-9082, 2022, <http://doi.org/10.1109/TAP.2022.3184510>.
- [8] M. Talafi Noghani, A. Karami Horestani, F. Sadeghikia, and M. R. Dorbin, "Theoretical modeling of resonant wavelength in 3-layered plasma antennas," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 31, no. 6, pp. 1587-1596, 2021, <https://doi.org/10.1080/17455030.2019.1687959>.
- [9] F. Sadeghikia, F. Hodjat Kashani, J. Rashed Mohassel, and J. Ghayoomeh Bozorgi,

است. این موضوع امروزه مورد توجه پژوهشگران و علاقه‌مندان این حوزه قرار دارد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، ساختار جدیدی از آنتن شیپوری هرمی ارائه شده است که در آن، با استفاده از گسترش ابعاد آنتن مبتنی بر فناوری پلاسما، قابلیت هدایت پرتو تشعشی و کنترل مشخصات تشعشی برای آنتن فراهم می‌شود. در این ساختار، دودسته از تیغه‌های پلاسمایی در امتداد آنتن قرار گرفته‌اند؛ دسته اول چهار تیغه پلاسمایی بر صفحه روزنه آنتن عمود بوده و در امتداد محور آنتن شیپوری گسترش یافته‌اند و دسته دوم، چهار تیغه پلاسمایی هستند که با محور عمود بر دهانه روزنه آنتن زاویه می‌سازند.

نتایج حاصل از تحلیل این ساختار نشان داد که با ثابت در نظر گرفتن فرکانس پلاسما و ابعاد تیغه‌ها، خاموش و روشن شدن تیغه‌های پلاسمایی می‌تواند علاوه بر ایجاد قابلیت کنترل مقدار بهره تشعشی، پرتو تشعشی آنتن را نیز به جهات مختلف هدایت کند. در این حالت، طول تیغه‌های پلاسمایی و نیز زاویه تیغه‌های مورب نقش مهمی در میزان زاویه هدایت پرتو و مقدار بهره آنتن دارند. بررسی‌ها نشان دادند که مقدار بهینه‌ای برای این مقادیر وجود دارد و افزایش یا کاهش بیش از حد این مقادیر نمی‌تواند منجر به نتایج مطلوب‌تر شود.

در ادامه این پژوهش، اثرات کنترل فرکانس پلاسما در تیغه‌های پلاسمایی، با ثابت در نظر گرفتن ابعاد، زاویه و تعداد تیغه‌های تحریک‌شده نشان دادند که در صورت برخورداری از امکان کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغه‌ها، با تعداد کمتری از تیغه‌های پلاسمایی حول آنتن می‌توان هدایت پرتو تشعشی آنتن را محقق نمود. وجود تیغه‌های دی‌الکتریک پلاسمایی تأثیر قابل توجهی بر تطبیق امپدانس و بازدهی آنتن ندارند و در صورت خاموش کردن آن‌ها، آنتن تبدیل به یک آنتن شیپوری هرمی معمولی می‌شود.

به‌طور خلاصه، ویژگی‌های آنتن پیشنهادی در این مقاله عبارت است از:

(الف) قابلیت باز پیکربندی و کنترل مقدار بهره تشعشی آنتن تا dB

۶/۵

(ب) هدایت جهت پرتو تشعشی آنتن تا محدوده  $\pm 12^\circ$  درجه در فضای

سه‌بعدی بدون استفاده از ادوات مکانیکی یا الکترونیکی پیچیده.

- Letters*, vol. 16, pp. 1155–1158, 2016, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2625800>.
- [18] A. Karami Horestani, M. Talafi Noghani, F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, M. Valipour, and F. Martín, "Reconfigurable and frequency tunable inverted F antenna based on plasma technology," in *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Granada, Spain, 2019, pp. 1175-1177, <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2019.8879280>.
- [19] F. Sadeghikiya, F. Hojat Kashani, J. Rashed Mohasel, and J. Ghiyome Bozorgi, "Space application of a linear array of plasma antenna," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 59-66, 2012, (in Persian).
- [20] F. Sadeghikia, "Plasma antenna technology in space missions," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 27-34, 2017, (in Persian).
- [21] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1137-1140, 2013, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2013.2281221>.
- [22] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance of a reconfigurable reflector antenna with scanning capability using low-cost plasma elements," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 12, pp. 2869-2874, 2013, <https://doi.org/10.1002/mop.27958>.
- [23] F. Sadeghikia, M. Valipour, M. Talafi Noghani, H. Ja'afar, and A. Karami Horestani, "3D beam steering end-fire helical antenna with beamwidth control using plasma reflectors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2507–2512, 2021, <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3031473>.
- [24] F. Sadeghikia, M. Valipour, A. Karami Horestani, M. Himdi, and T. Anderson, "Beam-steerable helical antenna using plasma reflectors," in *16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Madrid, Spain, 2022, pp. 1-4, <https://doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9769604>.
- [25] H. Ja'afar, M. T. B. Ali, A. N. B. Dagang, H. M. Zali, and N. A. Halili, "A reconfigurable monopole antenna with fluorescent tubes using plasma windowing concepts for 4.9-GHz application," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 3, pp. 815-820, 2015, <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2398878>.
- "Characterization of a surface wave driven plasma monopole antenna," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 26, no. 2-3, pp. 239-250, 2012, <https://doi.org/10.1163/156939312800030857>.
- [10] F. Sadeghikia, M. R. Doorbin, H. Ja'afar, A. Karami Horestani, and M. Talafi Noghani, "An overview on the implementation of surface wave driven plasma antennas," in *IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)*, Shah Alam, Malaysia, 2021, pp. 53-57, <https://doi.org/10.1109/ISWTA52208.2021.9587357>.
- [11] F. Sadeghikia, F. Hodjat Kashani, J. Rashed Mohassel, and J. Ghayoomeh Bozorgi, "The effects of the tube characteristics on the performance of a plasma monopole antenna," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Moscow, Russia, 2012, p. 1209.
- [12] F. Sadeghikia, F. Hodjat Kashani, J. Rashed Mohassel, and J. Ghayoomeh Bozorgi, "Characteristics of plasma antennas under radial and axial density variations," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Moscow, Russia, 2012, pp. 1212–1215.
- [13] F. Sadeghikia, A. Karami Horestani, M. Talafi Noghani, M. R. Dorbin, H. Mahdikia, and H. Ja'afar, "A study on the effect of the radius of a cylindrical plasma antenna on its radiation efficiency," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 204-206, 2018.
- [14] F. Sadeghikia, M. Talafi Noghani, and M. R. Dorbin, "A study on the physical characteristics and development of plasma reflectors," *Journal of Radar*, vol. 9, no. 1, pp. 35-44, 2021, (in Persian).
- [15] F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, A. Karami Horestani, M. Talafi Noghani, and H. Ja'afar, "Tunable inverted-F antenna using plasma technologies," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 702–706, 2019, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2901354>.
- [16] F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, A. Karami Horestani, M. Talafi Noghani, and H. Ja'afar, "Multi-beam frequency tunable antenna based on plasma-nested helix," in *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 2019, pp. 1-3.
- [17] M. O. Arend, F. C. C. De Castro, C. Müller, and M. C. F. De Castro, "Toroidal plasma lens antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation*

- [27] F. Sadeghikia, K. Zafari, M. R. Dorbin, M. Himdi, and A. Karami Horestani, "Reconfigurable biconcave lens antenna based on plasma technology," *Scientific Report*, vol. 13, 2023, Art. no. 9213, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36332-9>.
- [26] T. Anderson, "Antenna beam focusing and steering with refraction through a plasma," in *13th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Krakow, Poland, 2019, pp. 1-5.