

Pages: 1-16/ Research Paper / Submit: 17 July 2023 / Accepted: 25 September 2023

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

SS

Jaafar Bazrafshan¹⁽⁰⁾, Fatemeh Sadeghikia^{2*}⁽⁰⁾, Ali Karami Horestani³⁽⁰⁾, And Himdi Mohamed⁴⁽⁰⁾

1. P.h.D Student, Aerospace Research Institute of Iran Ministry of Science, Technology and Research, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Aerospace Research Institute of Iran Ministry of Science, Technology and Research, Tehran, Iran

3.Assistant Professor, Aerospace Research Institute of Iran Ministry of Science, Technology and Research, Tehran, Iran

4. Professor, University of Rennes 1, Rennes, France

*Corresponding Author's E-Mail: sadeghi_kia@ari.ac.ir

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 offers electronic control over both 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, complemented 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 of these slabs allows for fine-grained control over the radiation gain and beam steering of the pyramidal horn antenna. The selection of appropriate dimensions and angles for the plasma slabs plays a crucial role 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. Additionally, the main beam direction can be steered within a range of ± 12 degrees. This research presents a promising approach for achieving reconfigurability and beam steering capabilities in antenna systems through the utilization of plasma dielectric slabs. The proposed design offers enhanced performance and flexibility, making it suitable for various applications in the field of antenna technology. The beam steering and radiation gain control is very important in satellite and space communications without using mechanical devices.

Keywords: Horn antenna, Dielectric plasma slabs, Beam direction, Gain control, Reconfigurable antenna, Beam steering antenna.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of <u>the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)</u>

How to Cite this Article:

J. Bazrafshan, F. Sadeghikia, A. Karami Horestani , and H., Mohamed, " A Reconfigurable and Steerable Horn Antenna using Plasma Dielectric Slabs for Controllable Gain and Beam Steering," *Space Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 1-16, 2024 (in Persian).

DOI:

ص. ص. ١٢- ١ / مقاله علمي- پژوهشي / دريافت: ١٤٠٢/٠٤// پذيرش: ١٤٠٢/٠٧/٠٣

بازپیکربندی و هدایت پرتو در آنتن شیپوری با استفاده از تیغههای دیالکتریک پلاسمایی باهدف کنترل مقدار بهره و جهت پرتو تشعشعی

جعفر بذر افشان 🔍، فاطمه صادقی کیا^۲* 🔍، علی کرمی هرستانی ۳ 🔍 و مُحَمِد هیمدی ۴

۳، ۲، ۱ - پژوهشگاه هوافضا ، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران ۴- دانشگاه رن۱، رن، فرانسه * ایمیل نویسنده مخاطب: sadeghi_kia@ari.ac.ir

در مقاله حاضر، مبتنی بر استفاده از دی لکتریکهای پلاسمایی در امتداد روزنه آنتن شیپوری هرمی، آنتن جدیدی معرفی می شود که دارای قابلیت باز پیکربندی و کنترل پذیری در مقدار بهره و جهت پرتو تشعشعی است. در این آنتن، چهار تیغه ی پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه و در امتداد محور آنتن و چهار تیغه ی پلاسمایی دیگر به صورت مورب با تیغههای قبل قرار دارند. برخورداری از قابلیت روشن و خاموش شدن مستقل هر تیغه و یا کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغههای قبل قرار دارند. برخورداری از قابلیت روشن و خاموش شدن مستقل هر تیغه و یا کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغههای قبل قرار دارند. برخورداری از قابلیت روشن و خاموش شدن مستقل هر تیغه و یا کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغههای پارامتری در خصوص گسترش طول و زاویه ی این تیغه ها نشان می دهد که انتخار برای آنتن شیپوری تحلیل های پارامتری در خصوص گسترش طول و زاویه ی این تیغه ها نشان می دهد که انتخار برای آنتن شیپوری در فرکانس مرکزی SHL اسلامی مورد بازه زاویه هدایت پرتو و مقدار بهره آنتن دارد. این ساختار برای آنتن شیپوری نمونه طراحی شده، مقدار کنترل پذیری بهره تشعشعی با استفاده از تیغههای پلاسمایی قدر کانسی نیز وجود دارد. در نمونه طراحی شده ی قش مهمی در بازه زاویه ای هدایت پرتو و مقدار بهره آنتن دارد. این ساختار برای آنتن شیپوری در فرکانس مرکزی TH درجه مشاهده است و امکان طراحی آن برای سایر بازه های فرکانسی نیز وجود دارد. در نمونه طراحی شده، مقدار کنترل پذیری بهره تشعشعی با استفاده از تیغه های پلاسمایی BB داری و کانش میزان هدایت آن، در ارتباطات فضایی و کاربردهای راداری بسیار با اهمیت است.

واژههای کلیدی: آنتن شیپوری هرمی، تیغههای دیالکتریک پلاسمایی، هدایت پرتو تشعشعی، کنترل بهره، آنتن دارای قابلیت بازپیکربندی، آنتن دارای قابلیت هدایت پرتو

مقدمه	علائم اختصاري		
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	ω _p ω υ HPBW SLL ε _r	فرکانس زاویهای پلاسما فرکانس زاویهای فرکانس برخورد عرض پرتو نیمتوان نسبت گلبرگ فرعی به گلبرگ اصلی ضریب گذردهی الکتریکی نسبی	
۳. استادیار ۴ استاد		۱. دانشجوی دکتری ۲ دانشاه (نویسنده مخاطب)	

COPYRIGHTS

ISST

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of <u>the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)</u>

قابل توجهی نسبت به سایر انواع آنتنها برخوردار هستند. از مهم ترین مزایای این آنتنها می توان 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 می توان به عنوان رسانای الکتریکی یا دی الکتریک در ساختار آنتنها استفاده نمود. رایج ترین و ارزان ترین ساختار پلاسمایی، محفظهی تجاری فلورسنت است که از یک پوسته دی الکتریک، به عنوان محفظه، و گاز بی اثر یونیزه شده داخل محفظه تشکیل می شود و در شکل ها 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 كنترل الكتريكي عوامل تحريك ميتوان پلاسمايي ايجاد نمود كه مشخصات فيزيكي أن بهصورت الكترونيكي قابل كنترل است [١٠-۱۴]. مبتنی بر این ویژگیها، کاربردهای مختلفی از پلاسما در ساختار آنتنها مورد تحلیل و ارزیابی قرارگرفته و درنتیجه، انواع مختلفی از آنتن های مبتنی بر فناوری پلاسما تاکنون معرفی شدهاند [10-۲۷]. هدایت جهت پرتو تشعشعی آنتن که رایجاً با استفاده از عناصر مکانیکی نظیر موتورها، یا استفاده از یکی از انواع سوئیچها در ساختار آنتنها امکان پذیر 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 [۲۲-۲۶]. هدایت جهت پرتو در عمده این ساختارها مبتنی بر روشن و خاموش کردن رساناهای پلاسمایی در ساختار آنتن ایجادشده است [۲۲–۲۵]؛ لکن پژوهشهای بسیار محدودی نیز مبتنی بر استفاده از خاصیت دیالکتریک پلاسما برای هدایت جهت پرتو آنتن در مراجع مشاهده می شوند [۲۶]. با این وجود و با توجه به قابلیت بازپیکربندی محيط پلاسما، مىتوان پيشبينى نمود كه امكان تركيب عناصر پلاسمایی، در حالتهای رسانایی یا دیالکتریک، با انواع متنوعتری از آنتنها نيز 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 می گیرد. لازم بهذکر است که این پژوهش، صرفاً امکانسنجی طرح پیشنهادی و مطالعهی پارامتری آن است و پژوهش های بیشتر در زمینه پیادهسازی این طرح، به مطالعات آتی موکول خواهد شد. بهطور خلاصه می توان ادعا نمود که نوآوری این مقاله، در استفاده از تیغههای پلاسمایی، بهعنوان دیالکتریک، و نه بهعنوان رسانا، در امتداد آنتن شیپوری، بهدوصورت 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 می شود. از آن جا که این آنتن از ترکیب آنتن شیپوری هرمی با هشت تیغهی پلاسمایی مستطیلی در امتداد بخش انتهایی آنتن شکل می گیرد 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 می شود. بنابراین، در بخش چهارم از این مقاله، برخی از حالتهای عملكردى أنتن تشريح شده و مشخصات تشعشعي أنتن در أن حالتها ارائه می شود. تیغههای پلاسمایی، علاوه بر برخورداری از قابلیت روشن و خاموش شدن، با استفاده از کنترل عوامل تحریک، می توانند داراى قابليت كنترل مشخصات فيزيكي، نظير تغيير فركانس پلاسما نیز باشند. بررسی اثرات تغییر مشخصات فیزیکی پلاسما در تیغههای پلاسمایی بر مشخصات تشعشعی آنتن نیز یکی دیگر از مواردی است که در بخش چهارم به آن پرداخته می شود. برای تحلیل ها، از نرمافزار تجاری تمامموج CST استفاده می شود. این پژوهش در بخش پنجم جمعبندی و نتیجه گیری می شود.

تئوري پلاسما

برای تحلیل اثر محیط پلاسما بر مشخصات تشعشعی آنتن، ابتدا برخی روابط حاکم بر محیط پلاسما در این فصل تشریح می شوند.

قابلیت گذردهی مختلط پلاسمای همگن، ... ج، در شرایط کمفشار با رابطه زیر بیان میشود [۲]:

$$\mathcal{E}_{r} = \mathcal{E}_{r} - j \mathcal{E}_{r} = 1 - \frac{\left(\frac{\omega_{p}}{\omega}\right)^{2}}{1 + \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^{2}} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\left(\frac{\omega_{p}}{\omega}\right)^{2}}{1 + \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^{2}}$$
(1)

که در آن، ω_p فرکاس زاویه ای پلاسما (rad/s)، υ فرکانس (rad/s) برخورد الکترون – خنثی (Hz) و ω فرکانس کاری آنتن (rad/s) است. فرکانس زاویه ای پلاسما تابع مقدار چگالی الکترون، N، بار الکترون، v، و جرم الکترون، m_e ، است و رابطه آن به صورت زیر تعریف می شود [7]:

بازپیکربندی و هدایت پرتو در آنتن شیپوری با استفاده از تیغه¬های دی¬الکتریک پلاسمایی باهدف

$$\omega_{\rm p} = \sqrt{\frac{{\rm N} {\rm e}^2}{\epsilon_0 m_{\rm e}}} \tag{(Y)}$$

با صرفنظر از قسمت موهومی (درصورتی 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 می شود.

$$\varepsilon_{\rm r} \approx 1 - \frac{\omega_{\rm p}^2}{\omega^2 + \nu^2} \tag{(Y)}$$

در این محیط، ثابت انتشار برابر است با:

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

چنانچه مقدار فرکانس برخورد بهمیزان قابل توجهی از فرکانس پلاسما کوچکتر باشد، در همه روابط بالا می توان 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 فركانس كارى برابر باشد، مقدار قابليت گذردهي محيط پلاسما برابر صفر خواهد شد. صفر شدن قابلیت گذردهی به این مفهوم است که جابجایی الکتریکی که تنها به بارهای آزاد بستگی دارد، حتی زمانی که شدت میدان الکتریکی برابر صفر نباشد، صفر خواهد بود. در این حالت، ممكن است بدون وجود بارهای آزاد، میدان الكتریکی بهصورت نوسانی در پلاسما وجود داشته باشد که اصطلاحاً به آن نوسانات يلاسما مي گويند.

در صورت تابش موج الکترومغناطیسی از خلاً به تیغهی پلاسمایی، ضریب انعکاس و انتقال موج برابر هستند با [۲]:

$$R = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}}$$
(δ)
$$T = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}}$$
(\mathcal{F})

با توجه به روابط بالا، چنانچه فركانس پلاسما از فركانس كارى آنتن به میزان قابلتوجهی بزرگتر باشد ($\omega_p \gg \omega$)، ضریب بازتاب از سطح پلاسما برابر منفی یک و ضریب انتقال در پلاسما برابر صفر می شود. در این حالت، تمامی موج تابیده شده به پلاسما منعکس شده و هيچ موجى وارد پلاسما نمى شود و بنابراين، 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 می شود و بنابراین، کل موج، بدون

انعکاس، وارد پلاسما می شود. 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 بهمعنای تضعیف بدون انتشار است. در این حالت امپدانس ذاتی منفی شده و خاصيت رسانايي پلاسما غالب است؛ لكن مقدار قابليت رسانايي آن در مقایسه با فلزات متداول کوچکتر خواهد بود. این حالت عملکردی از پلاسما در مراجع متنوعی، با هدف توسعه آنتن دارای قابلیت بازپیکربندی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. ۲) $(\omega_p < \omega)$ چنانچه فرکانس پلاسما از فرکانس کاری کوچکتر باشد (ثابت انتشار موهومی خالص شده و با فرض صرف نظر از تلفات برخوردی، امواج الکترومغناطیسی بدون تضعیف در محیط پلاسما انتشار می یابند. در چنین حالتی، محیط پلاسما را می توان به عنوان دیالکتریکی در نظر گرفت که قابلیت گذردهی الکتریکی نسبی آن عددی بین صفر و یک است. با وجود ظرفیت بسیار بالایی که برای این حالت عملکردی پلاسما در حوزه مخابرات و توسعه آنتنهای دارای قابلیت بازپیکربندی میتوان متصور بود، پژوهشهای بسیار محدودی در این زمینه گزارش شدهاند [۲۶ – ۲۷] و می توان پیشبینی نمود که طی سالهای آینده توجه پژوهشگران زیادی به بهرهبرداری از این حالت عملکردی پلاسما معطوف شود. آنتن پیشنهاد شده در این پژوهش، از این حالت عملکردی پلاسما برای هدایت جهت پرتو تشعشعی آنتن شیپوری استفاده میکند. ۳) زمانی که فرکانس پلاسما و فرکانس کاری برابر باشد با تقریب خوبی مقدار گذردهی و درنتیجه ضریب شکست پلاسما به صفر نزدیک خواهد شد. بهطوركلي، تعامل موج الكترومغناطيسي با پلاسما در حالتي كه فركانس تحريك پلاسما و فركانس موج برابر باشند، باعث ايجاد تأثيرات پيچيده و تعاملات وابسته به شرايط خاص پلاسما مي شود كه می تواند موضوع ارزشمندی برای پژوهشهای آینده باشد.

معرفى ساختار أنتن ييشنهادي

پس از آشنایی با مشخصات محیط پلاسما در بخش دوم، در این بخش، مبتنی بر خاصیت دیالکتریک پلاسما، ساختار جدیدی از ترکیب آنتن شيپورى هرمى و ساختارهاى پلاسمايى ارائه مى شود كه قابليت هدايت پرتو تشعشعی دارد. ساختار آنتن پیشنهادی در شکل ۱ نشان دادهشده است. آنتن شیپوری هرمی استاندارد در باند X (۸–۱۲ GHz)، که دهانه

^{1.} Electric Displacement

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی دورهٔ ۱۷ / شمارهٔ ۱ / بهار ۱۴۰۲ (پیاپی ۶۰)

روزنه آن در صفحه y-x و محور آنتن در امتداد محور z قرار گرفته است، تشعشع کننده اصلی در این ساختار می باشد. بهره آنتن شیپوری در فرکانس HPBK ۲۰ برابر BB ۲۰ نسبت گلبرگ فرعی به اصلی (SLL) برابر dB ۲۰/۸ و مقدار عرض پرتو نیمتوان (HPBW) برابر ۲۶/۸۵ است. این آنتن بهعنوان تغذیهی تیغههای پلاسمایی استفاده شده است که در طراحی آن موجبر WR90 به کار رفته است. ابعاد دهانهی آنتن نیز که در طراحی آن موجبر WR90 به کار رفته است. ابعاد دهانهی آنتن نیز اضلاع آنتن شیپوری در صفحات Pala و ndlaده میشود، اضلاع آنتن شیپوری در دو امتداد عمود بر لبههای روزنه و نیز زاویهی بازشدگی ۱۵ درجه یک انتخاب اولیه است و در بخشهای بعدی در خصوص راویه ۵۵ درجه یک انتخاب اولیه است و در بخشهای بعدی در خصوص مقدار این زاویه بررسیهای بیشتری انجام خواهد شد. ضخامت و طول مقدار این زاویه براسیهای به ترتیب برابر mm ۵ و سام ۱۵۰ است درحالی که مر تیغهی پلاسمایی به ترتیب برابر mm ۵ و سام ۱۵۰ است درحالی که



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

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 تیغهی پلاسمایی مستقلا 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 ۵ است و چگالی پلاسما 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 عموما گازی شکل هستند، در عمل باید از یک محفظه دیالکتریک برای محصور نمودن پلاسما استفاده شود. محفظههای تجاری فلورسنت به

میزان 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 [۱۶–۲۷]. با این وجود، با توجه به آن که هدف از این مقاله امکان سنجی تحقق طرح پیشنهادی است، جزئیات بیشتر مربوط به نحوه تحقق آنتن در مطالعات آتی ارائه خواهد شد.

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

بررسى مشخصات تشعشعي أنتن پيشنهادي

پس از معرفی ساختار کلی آنتن پیشنهادی، در این بخش مشخصات تشعشعی آنتن در حالتهای مختلف تحریک تیغههای پلاسمایی بررسی میشوند. با توجه به امکان روشن و خاموش کردن تیغههای پلاسما و نیز کنترل مقدار فرکانس پلاسما در هر تیغه، در این بخش دو ساختار کلی از آنتن مورد تحلیل و ارزیابی قرار می گیرد. در ساختار اول که هدایت پرتو تشعشعی مبتنی بر خاموش و روشن شدن برخی از تیغههای پلاسمایی شکل می گیرد، مقدار فرکانس پلاسما در همهی تيغههاي پلاسمايي ثابت است و اثرات مربوط به خاموش و روشن شدن تيغهها بر مشخصات تشعشعی آنتن و نيز جهت پرتو تشعشعی آنتن شیپوری بررسی می شود. در این ساختار، مقدار فرکانس پلاسما در هر تیغهی پلاسمایی روشن برابر با GHz ۸ و مقدار فرکانس برخورد در آن برابر با ۱/۸ GHz فرض شده است. در این حالت مقدار گذردهی نسبی پلاسما طبق رابطه (۳) تقريباً برابر ۰/۳۶ خواهد شد. انتخاب اين مقادير 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 شبیهسازی ها داشته باشند.

در ساختار دوم که صرفا از چهار تیغه ی پلاسمایی عمود بر روزنه آنتن استفاده می شود، اثرات ناشی از تغییرات مقدار فرکانس پلاسما در هر تیغه بر کنترل جهت پرتو تشعشعی بررسی می شود. کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغهها با استفاده از کنترل مقدار جریان در مدار تحریک هر تیغه امکان پذیر است.

مشخصات تشعشعی آنتن پیشنهادی با خاموش و روشن شدن تیغههای پلاسمایی

همان طور که در مقدمه این بخش اشاره شد، در این ساختار، مقدار فرکانس پلاسما در تیغههای پلاسمایی تحریکشده برابر با GHz ۸ و مقدار فرکانس برخورد در آنها برابر با ۱/۸ GHz است. در چنین

حالتی، با توجه به آن که فرکانس کاری موردنظر آنتن شیپوری برابر ۱۰ GHz است، تیغههای پلاسمایی بهعنوان دیالکتریک در امتداد آنتن شیپوری قرار می گیرند. با توجه به وجود هشت تیغه در اطراف آنتن شیپوری، در این قسمت تأثیر روشن و خاموش شدن تیغهها بر مشخصات تشعشعی آنتن شیپوری بررسی میشوند. برای درک بهتر عملکرد آنتن در حالتهای مختلف تیغههای پلاسمایی روشن، سه حالت اصلی از خاموش و روشن شدن تیغهها در ادامه به تفکیک معرفیشده و مشخصات تشعشعی آنتن در هر حالت، شبیهسازی شده و نتایج آن مورد تحلیل و ارزیابی قرار می گیرد.

تحریک یا عدم تحریک همزمان کلیهی 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 می دهد که امواج الکترومغناطیسی به صورت کروی از روزنه این آنتن در فضا منتشر می شوند و وجود تیغههای پلاسمایی خاموش، تأثیری بر توزیع میدان الکتریکی ساطح شده از دهانه ی آنتن ندارد زیرا قابلیت گذردهی پلاسمای خاموش با خلاً یکسان است. با تحریک همزمان همه ی تیغههای پلاسمایی، همان گونه که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است، امواج الکترومغناطیسی به صورت امواج شبه صفحهای از آنتن منتشر می شوند. تبدیل امواج کروی به امواج شبه صفحهای در حالت روشن شدن تیغههای پلاسمایی به دلیل جبران خطای فاز امواج کروی به واسطه ی حضور ماده ی دی الکتریک با ضریب دی الکتریک کوچکتر از ۲ می تواند عامل افزایش مقدار بهره در آنتن شود حال آنکه ابعاد فیزیکی روزنه تشعشعی ثابت و بدون تغییر بوده است.



شکل ۲ – توزیع میدان الکتریکی در آنتن پیشنهادی در دوحالت: (الف) خاموش بودن کلیهی تیغههای پلاسمایی، (ب) روشن بودن کلیهی تیغههای پلاسمایی

مقایسهی بهره تشعشعشی 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 همهی تیغههای پلاسمایی، مقدار بهره، SLL و نیز HPBW آنتن در

فرکانس GHz به ترتیب برابر با dB، ۱۸/۸ dBi و ۱۶/۶ و ۲۱۵ است و این به معنای حدود dB ۲/۸ بهبود در مقدار بهره تشعشعی آنتن شیپوری با تیغههای پلاسمایی تحریکشده نسبت به بهرهی آنتن شیپوری بدون تیغه است. 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 پلاسما این است که بهره آنتن پیشنهادی بین این دو مقدار بهره تشعشعی، قابلیت سوئیچ شدن دارد. به علاوه، در چنین حالتی مقدار SLL نسبت به آنتن شیپوری حدود dB



شکل ۳-. مقایسه بهره تشعشعی شبیهسازی شده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰GHz در دو حالت عدم تحریک (خط ممتد) و تحریک کلیهی تیغههای پلاسمایی (خطچین).

نمودار تغییرات بهره شبیهسازی شده برای آنتن حاصل در بازه فرکانسی GHz–۱۲ GHz در شکل ۴ (الف) ارائه شده است. در این نمودار، خط سیاه توپر، شاخص تغییرات بهره در آنتنی است که کلیهی تیغههای پلاسمایی در آن خاموش هستند و خطچین مربوط به آنتنی است که کلیه تیغههای پلاسمایی تحریک شدهاند. این نمودار نشان میدهد که به طورکلی با تحریک همهی تیغههای پلاسمایی، مقدار بهره آنتن در بازه فرکانسی مورد بررسی افزایش داشته است. با هدف بررسی اثرات تیغههای پلاسمایی بر تطبیق امیدانس آنتن شیپوری، در شکل ۴ (ب) نمودار تغییرات پارامتر S₁₁ آنتن پیشنهادی، در دو حالت تحریک همزمان همهی تیغهها و عدم تحریک آنها نشان داده شده است. لازم بهذکر است که در آنتن شیپوری تشعشع کننده اصلی، تطبیق امیدانس در بازه فرکانسی موردنظر بهصورت کامل برقرار است. نتایج نشان میدهد که تحریک یا عدم تحریک تیغههای پلاسمایی اثر قابل توجهی بر مشخصه تطبيق امپدانس آنتن ندارد و اين بدان معناست که در صورت استفاده از تیغههای دیالکتریک پلاسمایی برای هدایت پرتو و کنترل بهره در آنتن شیپوری، تطبیق امپدانس آسیبی نخواهد دید.

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی دورهٔ ۱۷ / شمارهٔ ۱ / بهار ۱۴۰۲ (پیاپی ۶۰)



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

بهطور خلاصه، تاکنون تأثیر تحریک یا عدم تحریک همزمان کلیه تیغههای پلاسمایی بر پارامترهای تشعشعی آنتن پیشنهادی بررسی شدند و نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان دادند که تحریک همزمان کلیه ی تیغههای پلاسمایی می تواند سبب بهبود بهره ی تشعشعی 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 سوئیچشدن دارد. بررسی تأثیر تیغههای پلاسمایی روشن و خاموش بر بازدهی کل آنتن نشان می دهد، هرگاه همه تیغههای پلاسمایی روشن هستند بازده کل

تحریک چهار تیغهی 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

جعفر بذر افشان، فاطمه صادقی کیا، علی کرمی هرستانی، محمد هیمدی

شکل ۵ خاموش می شوند. در این حالت، مقدار بهره تشعشعی 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 ط۵ ۱۰/۵ – است. این نتایج نشان می دهند که همان طور که انتظار می رود تقارن تیغههای پلاسمایی سبب افزایش بهره تشعشعی آنتن شده و اثری بر جهت پرتو ندارد و میزان افزایش بهره آنتن در چنین حالتی، نسبت به آنتن شیپوری که همهی تیغههای پلاسمایی در آن خاموش هستند برابر با ط۵ ۱/۷ است.



شکل ۵-. ساختار آنتن پیشنهادی در حالتی که کلیه تیغههای پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه تحریکشده و هر چهار تیغهی پلاسمایی مورب خاموش می شوند.

بهمنظور 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 تشعشعی 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 تشعشعی برابر ۱۶/۹ dBi و چنانچه طول تيغهها ۳۰۰ mm باشد، مقدار بهره برابر با ۱۵/۴ dBi می شود و این در حالی است که تیغههایی با طول mm ۱۵۰ بهرهای معادل ۱۷/۷ dBi برای آنتن ایجاد مینمود. 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- می شود. بهطور خلاصه از این تحلیلها می توان نتیجه گرفت که مقدار بهینهای برای طول تیغههای پلاسمایی وجود دارد و افزایش یا كاهش این طول از مقدار بهینه سبب كاهش مقدار بهره تشعشعی آنتن می شود زیرا طول مشخصی از تیغه ی پلاسمایی با ضریب دیالکتریک کوچکتر از ۱ باعث هم فاز شدن امواج در روزنهی آنتن و در نتیجه بهرهی بهینه می شود. با استفاده از تبغههای پلاسمایی با طولهای کوچکتر یا بزرگتر بهرهی آنتن از این مقدار بهينه كمتر خواهد بود. $\eta = G\lambda^2/4\pi A$



شکل ۶ – (الف) مقایسه اثر طول تینههای پلاسمایی بر بهره تشعشعی شبیهسازیشده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰GHz در حالتی که کلیه تینههای پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه تحریکشده و هر چهار تینه ی پلاسمایی مورب خاموش می شوند؛ (ب) نمودار اثرات طول تینههای پلاسمایی بر قطبش متقاطع؛ (ج) مقایسه تغییرات بازدهی روزنه آنتن با تغییر طول تینههای پلاسمایی.

برای بررسی اثرات ناشی از تیغهها بر قطبش متقاطع، در شکل ۶ (ب) نمودار تشعشعی آنتن در حالت قطبش متقاطع و اثرات طول تیغهها بر این قطبش نشان داده شده است. نتایج نشان میدهند که تیغهها و تغییر طول آنها تأثیر قابل توجهی بر قطبش متقاطع نسبت به آنتن شیپوری ندارد.

در شکل ۶ (ج)، نمودار تغییرات بازدهی روزنه آنتن (η) 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 تیغهی پلاسمایی مقایسه شده است. در محاسبه مقدار بازدهی روزنه، از رابطه (۲) استفاده می شود.

(Y)

در این رابطه، A مساحت فیزیکی روزنه، *۸* 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، بهدلیل ثابت ماندن مساحت روزنه، افزایش مقدار بهره نسبت به بهره آنتن شیپوری در فرکانس GHz، سبب افزایش بازدهی روزنه آنتن می شود و این نتیجه در نمودارهای ارائه شده در شکل ۶ (ج) قابل مشاهده است.

عدم تحریک دو تیغه از هشت تیغهی پلاسمایی

در این بخش، اثرات عدم تحریک ۲ تیغهی پلاسمایی از کل ۸ تیغهی پلاسمایی به کار رفته در ساختار آنتن، بر مشخصات تشعشعی کل آنتن بررسی می شود. به عنوان نمونه، در ساختار آنتن، با فرض تحریک کامل همهی تیغههای پلاسمایی، ابتدا دو تیغهی شمارهی ۱ و ۳ را خاموش کرده و مشخصات تشعشعی و نمودار توزیع میدان آنتن استخراج می شوند و در مرحلهی دوم، دوتیغهی شمارهی ۲ و ۴ خاموش شده و سایر تیغهها تحریک شده باقی می مانند. نتایج حاصل از مقایسه توزیع دامنه میدان الکتریکی این دو حالت در شکل ۷ نشان داده شده است.



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

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 هماز میشود، میدان در سمت تیغه-های مورب با میدان وسط روزنه اختلاف فاز دارد. بنابراین، طبق اصل هویگنس، میدان راهدور نهایی ناشی از میدانهای روزنهی آنتن مایل شده و پرتو آنتن نسبت به بردار عمود بر روزنهی آنتن زاویهدار خواهد بود. واضح است که زاویهی پرتو تابع طول، زاویه، و همچنین ضریب دیالکتریک تیغههای پلاسمایی است. بررسی دقیقتر این موضوع با مقایسه بهره تشعشعی هر دو حالت امکان پذیر است. در شکل ۸۰ بهره تشعشعی این

لفصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی
 ۲ (پیاپی ۶۰) دورهٔ ۱۷ / شمارهٔ ۱ / بهار ۱۴۰۲ (پیاپی ۶۰)

دو حالت با بهره تشعشعی آنتنی که کلیهی 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 همهی تیغههای پلاسمایی (خط مشکی ممتد) ۲) خاموش کردن تیغههای ۱ و ۳ (خطچین)، ۲) خاموش کردن تیغههای ۲ و ۴ (نقطهچین)

این نمودار نشان میدهد که در این دو حالت، مبتنی بر اینکه تیغه پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه درکدام جهت تحریک شده است، الگوی تشعشعی میدان الکتریکی آنتن بهاندازه ۸ درجه به سمت مقابل متمایل شده است. به علاوه، در این دو حالت، مقدار بهره تشعشعی آنتن برابر با طB ۱۹/۶ است که مبین طB ۳/۶ افزایش در مقدار بهره نسبت به آنتنی است که کلیهی 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 بهاندازه ۸± درجه وجود دارد. امکان خلاصه میتوان گفت در صورت تحریک ۶ تیغهی پلاسمایی متناسب با شمارههایی که در این بخش معرفی شدند، الگوی تشعشعی میدان الکتریکی آنتن جهتدار شده و مقدار بهره آنتن تا طB

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

یکی دیگر از حالتهای امکان پذیر برای آنتن پیشنهادی، حالتی است که در آن ۴ تیغهی پلاسمایی، مطابق تصویر نشان داده شده در شکل ۹، تحریک شده و ۴ تیغهی دیگر خاموش باشند. در شکل ۱۰ (الف) ، الگوی تشعشعی میدان الکتریکی آنتن در دو حالت زیر با یکدیگر و نیز با آنتنی که کلیهی تیغههای پلاسمایی در آن خاموش هستند، مقایسه شده است: ۱) تیغههای پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریک شده و سایر تیغههای پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ تحریک شده و سایر تیغههای پلاسمایی خاموش شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ تحریک شده و سایر تیغههای پلاسمایی خاموش تحریک شدهاند و در زاویه ۵۰ [[45]] = ϕ درجه تغییر جهت داده و تحریک شدهاند و در زاویه ۵۰ [[45]] = م درجه تغییر جهت داده و مقدار بهره آنتن نیز برابر Bit 5/18 است که به معنای 2 Bb بهبود در بهره تشعشعی آنتن نسبت به حالتی است که همهی تیغههای

جعفر بذر افشان، فاطمه صادقی کیا، علی کرمی هرستانی، محمد هیمدی

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. به علاوه در حالت دوم نیز الگوی تشعشعی آنتن به صورت کاملاً متقارن نسبت به حالت قبل و به مقدار ۸ درجه به سمت تیغههای مورب متمایل شده و در زاویه ٥٠ [[45]] =φ درجه بهره تشعشعی برابر Bi 5/18 است.



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

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



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



شکل ۱۱ – توزیع میدان الکتریکی در آنتن پیشنهادی: الف) تیغههای پلاسمایی شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ تحریکشده و سایر تیغهها خاموش هستند، (ب) تیغههای پلاسمایی شماره ۲، ۴، ۲ هو ۸ تحریکشده و سایر تیغههای پلاسمایی خاموش هستند.

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 تشعشعی دارد، در ادامه این بخش، دو تحلیل پارامتری مستقل روی طول تیغههای پلاسمایی و زاویهی بازشدگی تیغههای مورب، مطابق شکل ۱۲، انجام شده و نتایج آن بر مشخصات تشعشعی آنتن ارزیابی می شوند. در ادامه، به عنوان گام دوم، تحلیل پارامتری اثرات زاویهی بازشدگی (α) تیغههای پلاسمایی مورب، با ثابت در نظر گرفتن طول تیغهها برابر با مه در ۲۰ از ایه می شود.



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 زاویهی تیغههای پلاسمایی مورب.

در شکل ۱۳، اثرات افزایش یا کاهش طول هر چهار تیغهی 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

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی / ۱۱ دورهٔ ۱۷ / شمارهٔ ۱/ بهار ۱۴۰۳ (پیاپی ۶۰)

۱۹ GHz مدان المجروب المحلى المحلى آنتن با بهره المحال المحلى فركانس V GHz بهاندازه ۵ درجه در صفحه $\phi = 45^{\circ}$ هدايت مىشود؛ درحالى كه اگر از تيغههاى پلاسمايى با طول ۱۵۰ mm دادازه ۸ استفاده شود، پرتو اصلى با مقدار بهره dBi ۱۸/۵ بهاندازه ۸ درجه در $\phi = 45^{\circ}$ درجه هدايت مىشود. افزايش بيشتر طول تيغههاى پلاسمايى به مقدار سهره I dBi ۲۰ در زاويه ۱۱ درجه بهرهى تشعشعى و حصول مقدار بهره idBi ۲۰ در زاويه ۱۱ درجه در همان صفحه خواهد شد. به علاوه، نسبت گلبرگ فرعى به اصلى در هر سه حالت، از طول تيغههاى كوچكتر به طول واحد dB مىباشند. به طور خلاصه مىتوان نتيجه گرفت كه افزايش طول تيغههاى پلاسمايى در اين حالت، با ثابت ماندن زاويهى تيغههاى مورب سبب بهبود مقدار بهره تشعشعى و افزايش زاويه هدايت آنتن شدهاند.



شکل ۱۳ –. مقایسه اثر طول تیغههای پلاسمایی بر بهره تشعشعی شبیهسازیشده در صفحه E از آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۰GHz در حالتی که تیغههای پلاسمایی شماره ۱، ۲، ۵ و ۷ تحریکشده و سایر تیغهها خاموش هستند و زاویه بازشدگی ۱۵ درجه است.

افزایش مقدار زاویه بازشدگی تیغههای مورب تحریکشده، جهت پرتو آنتن را تا ۱۲ درجه حول محور اصلی تشعشعی هدایت پذیر می کند و این هدایت پرتو برای دو مقدار زاویه ی 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 به عنوان منبع و محاسبه میدان نهایی از جمع میدان نقاط فرضی با اصل هویگنس توجیه می شود. در این شکل شماره ی تیغههای تحریک شده نیز مشخص است. این نمودار مبین ۱۲± درجه هدایت پذیری در امتداد محور آنتن پیشنهادی است. تغییرات جزئی تر 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 داده شده است. در این نمودار، زاویه بازشدگی تیغههای مورب بین ۰ تا

استفاده از این مکانیسم جهت پرتو تشعشعی 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 تشعشعی نخواهد داشت زیرا هر چه تیغههای مورب زاویهی بیشتری نسبت به سطح افق داشته باشد، موج خارج شده از دهانهی آنتن شیپوری به سطح مقطع کوچکتری از تیغههای دی الکتریک پلاسمایی برخورد میکند. این افزایش زاویه از مقداری مشخص به بعد تاثیری بر جهت گیری پرتو آنتن نداشته و مقدار آن ثابت می ماند اما مقدار بهره تشعشعی آنتن کمتر میشود.



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



ن**سخل ۱۵** – ۰ اثرات زاویه بازشدکی تیغههای پلاسمایی مورب بر: (الف) جهت پرتو اصلی، (ب) مقدار بهره تشعشعی.

استفاده از این ساختار برای هدایت پرتو، همانند سایر روشهای هدایت پرتو می تواند عامل بروز تغییرات در مقدار بهره تشعشعی پرتو هدایت شده باشد. در شکل ۱۵ (ب) نمودار تغییرات بهره پرتو هدایت شده برحسب زاویه بازشدگی نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که با افزایش مقدار زاویه ی بازشدگی تا زاویه شکل نشان می دهد که با افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد و این زاویه حدی تابع مقدار عرض پرتو نیم توان آنتن شیپوری است و توجیه آن با اصل هویگنس امکان پذیر 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 زاویهی تیغههای پلاسمایی

مشخصات تشعشعی آنتن پیشنهادی با کنترل فرکانس پلاسما 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 پلاسما بر مشخصات تشعشعی آنتن بررسی و ارزیابی می شوند. 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 پلاسما تنها بر یک حالت از آنتن ارزیابی می شود؛ حال آن که امکان کنترل این مقدار در سایر حالتهای بررسی شده در قسمتهای قبل نیز وجود دارد.در این راستا، حالتی از آنتن در نظر گرفته می شود که مطابق شکل ۱۷ چهار تیغهی پلاسمایی عمود بر دهانهی روزنه تحریک شدهاند و چهار تیغهی مورب خاموش هستند. شمارهی تیغههای پلاسمایی تحریک شده عبارتاند از ۲، ۳، ۶ و ۷.



شکل ۱۷ –. ساختار آنتن پیشنهادی و شمارهی تیغههای تحریکشده، در حالتی که تیغههای پلاسمایی عمود بر دهانه روزنه تحریکشده و هر چهار تیغهی پلاسمایی مورب خاموش میشوند.



شکل ۱۸ – (الف) نمودار تغییرات مقدار بهره و جهت پرتو تشعشعی آنتن در صفحه E، با کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغههای پلاسمایی عمود بر دهانه آنتن شیپوری؛ fp1 مربوط به فرکانس پلاسما در تیغههای ۲ و ۷ و fp2 مربوط به فرکانس پلاسما در تیغههای ۳ و ۶ است؛ (ب) نمودار اثرات ناشی از تغییر فرکانس پلاسما بر قطبش متقاطع.

در این پژوهش، فرکانس پلاسمای دو تیغهی پلاسمایی در یکسوی آنتن، با شمارههای ۲ و ۲، با یکدیگر یکسان و متفاوت از مقدار فرکانس پلاسمای دو تیغه روبرو با شمارههای ۳ و ۶ در نظر گرفته میشود. کنترل فرکانس پلاسما 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 پلاسما در تیغههای ۲ و ۷ و f_{p2} معرف فرکانس پلاسما در تیغههای ۳ و ۶ است. کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغهها بین GHZ ۱ تا GHZ ۹ می تواند امکان هدایت پرتو بین ۱۰ ± درجه حول محور آنتن را فراهم آورد؛ زیرا با استفاده از رابطه (۳)، ضریب گذردهی نسبی در تیغهی پلاسمایی که مثلا فرکانس پلاسما در آن برابر GH ۱ است، بسیار نزدیک به یک (برابر ۲۰۹۹)، و در تیغههای پلاسمایی که فرکانس پلاسما برابر GHZ ۹ است برابر ۲۰٬۹۹ می باشد. این اختلاف در ثابت گذردهی باعث ایجاد اختلاف فازهای متفاوت در تیغههای پلاسمایی می شود. به عبارت دیگر دو تیغهای که ثابت گذردهی کمتری دارند موج را با سرعت بیشتری هدایت می کند. این امر باعث می شود قسمتی از موج بعد از عبور از تیغههای پلاسمایی از نظر فاز، عقب تر از سایر قسمتها قرار گرفته و در زوایای افق و ارتفاع متفاوت از محور اصلی قرار بگیرد. چنانچه مقدار فرکانس پلاسما در همهی تیغهها یکسان باشد، جهت بگیرد. چنانچه مقدار فرکانس پلاسما در همهی تیغهها یکسان باشد، جهت

بررسی اثرات ناشی از تغییر فرکانس پلاسما در تیغهها بر قطبش متقاطع، مطابق نتایج ارائهشده در شکل ۱۸ (ب)، نشان می دهد که تغییر فرکانس پلاسمایی تیغهها می تواند تغییرات جزئی بر مشخصات تشعشعی 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، می توان ادعا نمود که تغییرات فرکانس پلاسما در تیغههای پلاسمایی می تواند بر روی قطبش متقاطع به مقدار جزئی اثرگذار باشد.



شکل ۱۹ – نمودار تغییرات بازدهی آنتن با تغییر فرکانس پلاسما در تیغهها.

بررسی نمودارهای بازدهی روزنه این آنتن در مقادیر مختلف فرکانس پلاسما و مقایسه آنها با نمودار بازدهی روزنه در آنتن شیپوری معمولی در شکل ۱۹ نشان میدهد که افزایش میانگین فرکانس پلاسما در تیغهها سبب کاهش بازدهی روزنه آنتن شده و هرچه میانگین فرکانس پلاسما کمتر باشد، بازدهی آنتن به مقدار بازدهی آنتن شیپوری معمولی نزدیکتر میشود. نتایج نشان دادهاند

که با کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغههای پلاسمایی، علاوه بر امکان کنترل مقدار بهره تشعشعی، قابلیت هدایت جهت پرتو تشعشعی در آنتن نیز وجود دارد.

تصمیم گیری در خصوص انتخاب بین خاموش و روشن کردن تیغههای پلاسمایی یا کنترل مقدار فرکانس پلاسما در تیغهها منوط به نحوه تحقق ساختار آنتن و امکانات کنترلی آن است. در تمام موارد بالا و شبیهسازیهای انجامشده 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 پلاسما بازدهی آنتن تغذیه را تغییر نداده است.



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

تحلیل طرح پیشنهادی و چالشهای عملیاتی

پیرو بررسیهای انجام شده درخصوص طرح پیشنهادی آنتن شیپوری دارای قابلیت بازپیکربندی مبتنی بر فناوری پلاسما و مطالعات پارامتری انجام شده در زمینه عوامل مؤثر بر هدایت پرتو و کنترل مشخصات تشعشعی این آنتن در فصل چهارم، در این فصل، مقایسهی مختصری پیرامون تفاوتهای این طرح با سایر آنتنهای پلاسمایی معرفی شده در مراجع صورت گرفته و ویژگیهای خاص آن به صورت برجسته معرفی می شوند. 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، عمدهی آنتنهای دارای قابلیت هدایت پرتو مبتنی بر فناوری پلاسما که تاکنون مورد پژوهش قرار گرفتهاند، از خاصیت رسانایی پلاسما برای هدایت پرتو استفاده نمودهاند [۲۲ – ۲۵] 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

تشعشعی پوشش میدهند [۲۴]. اخیراً پژوهشهایی در زمینه استفاده از خاصیت دیالکتریک پلاسما در ساختار آنتن منتشر شدهاند [۱۷]، [۲۶] و [۲۷]. اما، تنها مطالعهی [۲۶] مدعی هدایت پرتو آنتن به واسطه استفاده از لنز استوانهای دیالکتریک پلاسما در ساختار آنتن است و هدایت جهت پرتو تشعشعی 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:

- ارائه طرحی نوین از آنتن شیپوری که به دلیل گسترش پلاسمایی در بخش انتهایی روزنه آنتن قابلیت هدایت پرتو و کنترل بهره پیدا می کند؛
- استفاده از خاصیت دی الکتریک پلاسما در ایجاد قابلیت هدایت پرتو در صفحه ارتفاع؛
- افزایش گستره هدایت پرتو تا ۱۲± 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 پیاده سازی، استحکام مکانیکی و سبکسازی است. این موضوع امروزه مورد توجه پژوهشگران و علاقمندان این حوزه قرار دارد.

نتيجهگيرى

در این مقاله، ساختار جدیدی از آنتن شیپوری هرمی ارائهشده است که در آن، با استفاده از گسترش ابعاد آنتن مبتنی بر فناوری پلاسما، قابلیت هدایت پرتو تشعشعی و کنترل مشخصات تشعشعی برای آنتن فراهم میشود. در این ساختار، دودسته از تیغههای پلاسمایی در امتداد آنتن قرارگرفتهاند؛ دسته اول چهار تیغه پلاسمایی بر صفحهی روزنه آنتن عمود بوده و در امتداد محور آنتن شیپوری گسترش یافتهاند و دسته دوم، چهار تیغهی 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 تشعشعی، پرتو تشعشعی آنتن را نیز به جهات مختلف هدایت کند. در این حالت، طول تیغههای پلاسمایی و نیز زاویهی تیغههای مورب نقش مهمی در میزان زاویهی هدایت پرتو و مقدار بهره آنتن دارند. بررسیها نشان دادند

بازپیکربندی و هدایت پرتو در أنتن شیپوری با استفاده از تیغه ⊂های دی⊂الکتریک پلاسمایی باهدف

70, no. 4, pp. 3040-3045, 2022, doi: <u>10.1109/TAP.2021.3139967</u>.

- [7] M.R. Dorbin, A. K Horestani, F. Sadeghikia, M. T Noghani, and H. Binti Ja'afar, "Analytical study on the resonance frequency of tunable surfacewave-excited plasma antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 9073-9082, 2022, doi: 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, doi: <u>https://doi.org/10.1080/17455030.2019.1687959</u>.
- [9] F. Sadeghikia, F. Hodjat-Kashani, J. Rashed-Mohassel, and J. Ghayoomeh-Bozorgi, "Characterization of a surface wave driven plasma monopole antenna," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 26, no. 2-3, pp. 239-250, 2012, doi: https://doi.org/10.1163/156939312800030857.
- [10] F. Sadeghikia, M. R. Doorbin, Hajar. Jaafar, A. K Horestani, and M. T Noghani, "An overview on the implementation of surface wave driven plasma antennas," *In 2021 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)*, pp. 53-57, 2021, doi: 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*, Moscow, Russia, 1209, 2012.
- [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*, Moscow, Russia, pp. 1212–1215, 2012.
- [13] F. Sadeghikia, A. K. Horestani, M. T. 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. T. 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. K. Horestani, M. T. 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, doi: <u>10.1109/LAWP.2019.2901354</u>.

که مقدار بهینهای برای این مقادیر وجود دارد و افزایش یا کاهش بیشازحد 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 تحریک شده 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 تشعشعی آنتن را محقق نمود. وجود تیغههای دی الکتریک 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 می شود.

بهطور خلاصه، ویژگیهای آنتن پیشنهادی در این مقاله عبارتند از: dB الف) قابلیت بازپیکربندی و کنترل مقدار بهره تشعشعی آنتن تا ۶/۵

ب) هدایت جهت پرتو تشعشعی آنتن تا محدوده ۱۲± درجه در فضای سهبعدی بدون استفاده از ادوات مکانیکی یا الکترونیکی پیچیده.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- 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, second edition, 2021.
- [3] V. Kumar, "A review of plasma antennas," *National Conference on Higher Education: Ways Ahead*, Delhi, India, Nov. 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, doi: <u>10.1109/TPS.2004.826019</u>.
- [5] F. Sadeghikia, M. T. 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, doi: https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.01.024.
- [6] M. R. Dorbin, J. A Rashed Mohassel, F. Sadeghikia, and H. Binti Ja'afar, "Analytical estimation of the efficiency of surface-waveexcited plasma monopole antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.

جعفر بذر افشان، فاطمه صادقی کیا، علی کرمی هرستانی، محمد هیمدی

reflector antenna with scanning capability using low-cost plasma elements", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 12, pp. 2869-2874, 2013, doi: https://doi.org/10.1002/mop.27958.

- [23] F. Sadeghikia, M. Valipour, M. T. Noghani, H. Ja'afar, and A. K. 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, doi: 10.1109/TAP.2020.3031473.
- [24] F. Sadeghikia, M. Valipour, A. K. Horestani, M. Himdi, and T. Anderson, "Beam-Steerable Helical Antenna Using Plasma Reflectors," *In* 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-4, IEEE, 2022, doi: 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 Transaction on Plasma Science*, vol. 43, no. 3, pp. 815-820, 2015, doi: 10.1109/TPS.2015.2398878.
- [26] T. Anderson, "Antenna Beam Focusing and Steering with Refraction Through a Plasma," In 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 1-5, 2019.
- [27] F. Sadeghikia, K. Zafari, MR. Dorbin, M. Himdi and A. K. Horestani, "Reconfigurable biconcave lens antenna based on plasma technology," *Scientific Report*, vol. 13, no.1, p. 9213, 2023, doi: <u>https://doi.org/10.1038/s41598-023-36332-9</u>.

- [16] F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, A. K. Horestani, M. T. Noghani, and H. Ja'afar, "Multi-beam frequency tunable antenna based on plasmanested helix," *In 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-3, IEEE, 2019.
- [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 Letters*, vol. 16, pp. 1155 – 1158, Nov. 2016, doi: <u>10.1109/LAWP.2016.2625800</u>.
- [18] A. K Horestani, M. T Noghani, F. Sadeghikia, M. R. Dorbin, M. Valipour, and F. Martín, "Reconfigurable and frequency tunable inverted F antenna based on plasma technology," *In 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pp. 1175-1177, 2019, doi: 10.1109/ICEAA.2019.8879280.
- [19] F. Sadeghikiya, F. Hojatkashani, J. Rashed Mohasel, and S. J. Ghiyome Bozorgi, "Space application of a linear array of plasma antenna," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 5, n. 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, doi: <u>10.1109/LAWP.2013.2281221</u>.
- [22] M. T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel, and M. Himdi, "Performance of a reconfigurable