



## Original Research Paper

## Design and Fabrication of Planar Sub-Array for Satellite Data Transmission Directive Conformal Array Antenna

Arian Zakiani<sup>1</sup>, Seyyed Hasan Sedighy<sup>2\*</sup>  and Razie Narimani<sup>3</sup> 

1. M. Sc., School of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2. Associate Professor, School of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3. Instructor, Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

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

Received 17 September 2023

Revised 23 September 2023

Accepted 01 October 2023

Available Online 01 October 2023

**Keywords:**

Array Antenna

Satellite

High Gain

Low Profile

Microstrip

**ABSTRACT**

High-gain antennas are crucial for ensuring stable communication in imaging and remote sensing satellites due to their ability to support high data transmission rates while compensating for the limitations associated with increasing transmitter power or reducing transmission rates. Various antenna types, including electromechanical pointing structures, planar phased array antennas, and conformal phased array antennas, are employed for high-resolution image transmission and communication with ground stations. In satellite communication systems, small-gain omnidirectional antennas typically exhibit a significant gain of 15 dBi. Among these, the conical structure maximizes effective area, while the polyhedral pyramidal structure is also highly effective. An X-band patch antenna was designed and subjected to full-wave simulation using CST software to enhance performance. The designed antenna achieved a peak gain of 5.64 dBi at 8.45 GHz. The antenna array configuration includes eight patch antennas mounted on each face of a polyhedral array, with power distributed via an 8-way Wilkinson power divider. The resulting array achieved a gain of 14.3 dBi, by array theory principles. The construction of a polyhedral conformal array yielded a maximum gain of 18.3 dBi, with consistent gains exceeding 15 dBi for elevation angles beyond 30°. A high-gain circularly polarized array antenna was specifically engineered for satellite system applications, ensuring a robust and effective design and construction. A triangular planar array facilitates the development of various conformal array configurations, making it well-suited for satellite applications.

\*Corresponding Author's E-mail: [sedighy@iust.ac.ir](mailto:sedighy@iust.ac.ir)**How to Cite this Article:**A. Zakiani, S. H. Sedighy, R. Narimani, "Design and Fabrication of Planar Sub-Array for Satellite Data Transmission Directive Conformal Array Antenna," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-77, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1461>.**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/).



## مقاله پژوهشی

# طراحی و ساخت زیر آرایه صفحه‌ای برای آنتن آرایه همدیس جهت لینک ارسال داده ماهواره

آرین زکیانی<sup>۱</sup>، سیدحسن صدیقی<sup>۲\*</sup> و راضیه نریمانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- مربی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

## چکیده

در این مقاله طراحی و ساخت آنتن آرایه‌ای مسطح فشرده با بهره زیاد برای ارسال داده‌های ماهواره در باند X ارائه شده است. با توجه به الزمات مأموریت ماهواره‌های تصویربرداری و نیاز به چرخش پرتوی آنتن در راستای دلخواه بدون استفاده از ساز و کار مکانیکی، آنتن آرایه همدیس یکی از بهترین گزینه‌ها به‌شمار می‌رود. براساس تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش، ساختار چند وجهی عملکرد مناسبی داشته و آرایه همدیس به‌صورت ۶ وجهی طراحی شده است. زیرآرایه‌های صفحه‌ای طراحی شده متشکل از ۸ المان پیچ دایروی، با بهره بالا و شبکه تغذیه مناسب است که قابلیت به‌کارگیری در این ساختارها را دارد. زیرآرایه صفحه‌ای مورد نظر پس از شبیه‌سازی، ساخته و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به‌دست آمده، طراحی انجام شده جهت رسیدن به آرایه همدیس براساس ابعاد در اختیار بر روی سازه ماهواره مناسب می‌باشد.

## اطلاعات مقاله

## تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۶ شهریور ۱۴۰۲

بازنگری ۱ مهر ۱۴۰۲

پذیرش ۹ مهر ۱۴۰۲

اولین انتشار ۹ مهر ۱۴۰۲

## واژه‌های کلیدی:

آنتن آرایه‌ای

ماهواره

بهره بالا

کم حجم

آرایه همدیس

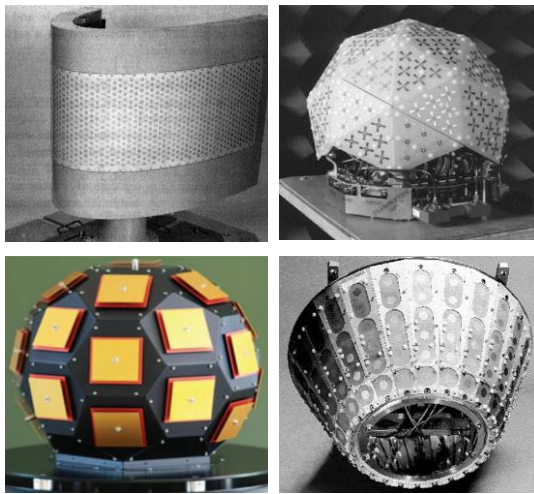
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [sedighy@iust.ac.ir](mailto:sedighy@iust.ac.ir)

## How to Cite this Article:

A. Zakiani, S. H. Sedighy, R. Narimani, "Design and Fabrication of Planar Sub-Array for Satellite Data Transmission Directive Conformal Array Antenna," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-77, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1461>.

## 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/).



شکل ۱- اشکال مختلف آنتن‌های آرایه همدیس [۵ و ۶]

Figure 1- Different types of conformal array antenna [5,6]

## طراحی آنتن آرایه

برای بررسی و تعریف مشخصات آنتن مورد نیاز در ماهواره‌های مشابه، در جدول (۱) مشخصات لینک ارسال داده ماهواره NigeriaSat\_2 در ارتفاع مداری ۷۰۰ کیلومتری به‌عنوان یک نمونه نشان داده شده است. فرکانس مرکزی لینک ارسال داده این ماهواره در باند x و با نرخ ارسال ۲۱۰ Mbps است. آنتن ماهواره دارای پلاریزاسیون دایروی و بهره ۱۵ dBi است. با توجه به این که به‌طور معمول از آنتن‌های همه‌جهته و با بهره کم‌تر در لینک ارتباطی ماهواره‌ها استفاده می‌شود، بهره ۱۵ dBi بهره زیادی نسبت به سایر آنتن‌های به‌کار رفته در ماهواره‌ها به‌شمار می‌آید. در این ماهواره از یک ساز و کار مکانیکی برای نشانه‌روی آنتن استفاده شده است که دارای ابعاد ۱۸۵×۱۹۶×۲۴۰ میلی‌متر است.

جدول ۱- مشخصات لینک ارسال داده ماهواره NigeriaSat\_2 [6]

Table 1- Specification of transmission link of NigeriaSat\_2 satellite

۷۰۰ Km	ارتفاع مداری ماهواره	۱
۸/۴۵ GHz	فرکانس	۲
۲۱۰ Mbps	نرخ ارسال داده	۳
۱۰ <sup>-۵</sup>	احتمال خطای بیت	۴
۶ W	توان ارسالی	۵
۱۵ dBi	بهره آنتن ماهواره	۶
دایروی	پلاریزاسیون آنتن ماهواره	۷
۲۹۰ K	دمای نویز آنتن ماهواره	۸
۷/۲ m	قطر آنتن ایستگاه زمینی	۹

## علائم و اختصارات

K	Kelvin
W	Watt
Km	Kilo Meter
dBi	deciles relative to isotropic
GHz	Gigahertz
Mbps	Megabits per second

## مقدمه

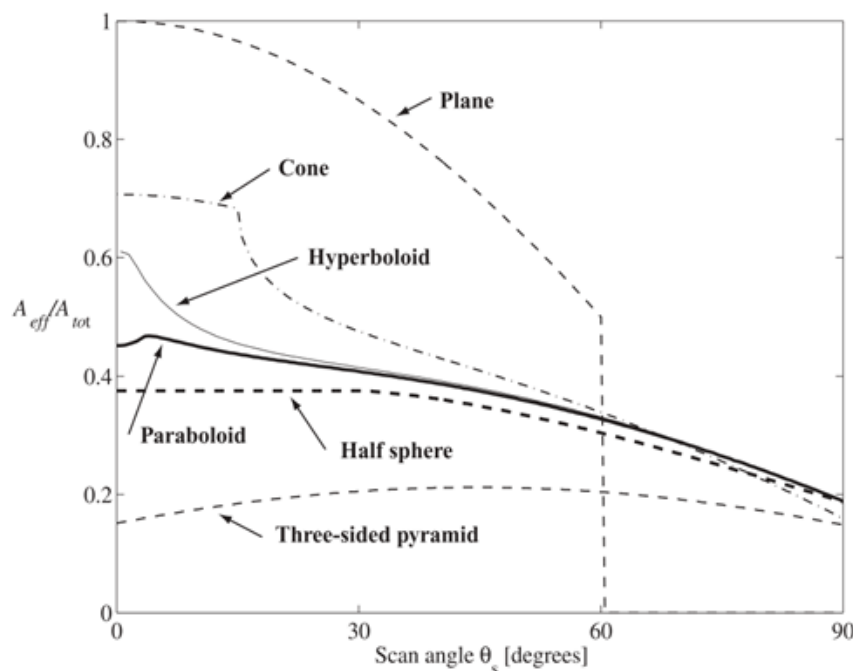
آن‌تن یکی از مهم‌ترین اجزای زیرسیستم مخابرات ماهواره بوده و ابعاد و جرم آن در طراحی ماهواره بسیار تأثیرگذار است. ساختار آنتن ماهواره باید در برابر فشار مقاوم بوده و شرایط محیطی فضا را تحمل کند. هم‌چنین بهره آنتن در بسته شدن لینک ارتباطی ماهواره با ایستگاه زمینی نقش برجسته‌ای را ایفا می‌کند. الزامات مأموریت از یک سو، و محدودیت جرم و حجم در ماهواره از سوی دیگر، استفاده از آنتن‌هایی با جرم کم، ابعاد کوچک، استحکام زیاد، مقاومت مناسب در شرایط محیطی فضا همراه با بهره بالا را هدف اصلی طراحان قرار داده است.

با توجه به نیاز به نرخ بالای ارسال داده در ماهواره‌های تصویربرداری و چالش برانگیز بودن افزایش توان فرستنده ماهواره، استفاده از آنتن با بهره بالا یکی از بهترین گزینه‌ها برای بسته نگاه داشتن لینک ارتباطی می‌باشد. آنتن‌های مختلفی در ماهواره‌ها به منظور برقراری ارتباط با ایستگاه زمینی و ارسال تصاویر با وضوح بالا استفاده می‌شوند. از انواع آنتن‌هایی که در ماهواره‌ها به‌کار می‌روند می‌توان به آنتن‌های دارای ساز و کار مکانیکی برای نشانه‌روی، ترکیبی از آنتن‌های آرایه فازی مسطح و ساز و کار مکانیکی نشانه‌روی و هم‌چنین آنتن‌های آرایه‌فازی با ساختار همدیس اشاره کرد [۱-۵].

با انتخاب آنتن‌های آرایه‌فازی به‌عنوان آنتن مورد استفاده در زیرسیستم مخابراتی ماهواره، ساز و کار مکانیکی نشانه‌روی آنتن حذف می‌شود. آنتن‌های آرایه فازی در ماهواره ناپایداری مکانیکی ایجاد نکرده و هم‌چنین خطای نشانه‌روی بسیار کم‌تری از ساز و کارهای مکانیکی نشانه‌روی پرتو آنتن دارند.

با توجه به نیاز برقراری ارتباط در زوایای فراز پایین و هم‌چنین چرخش پرتو آنتن به‌صورت غیرمکانیکی، یکی از بهترین گزینه‌ها استفاده از آنتن آرایه همدیس است. [۶-۱۰]. از آنتن‌های آرایه همدیس در بدنه هواپیماها، موشک‌ها و هم‌چنین در ماهواره‌ها استفاده می‌شود. برای مثال در شکل (۱) انواع مختلفی از ساختار آنتن‌های آرایه همدیس را نشان می‌دهد.

به‌عنوان یک معیار در آن رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، عملکرد آرایه به شکل آرایه وابسته است. هرم سه وجهی کم‌ترین سطح مقطع مؤثر را نسبت به دیگر اشکال به ازای تمامی جهتهای چرخش پرتو نشان می‌دهد. علاوه بر آن، آرایه صفحه‌ای عملکرد نامناسبی در جهتهای مطلوب چرخش پرتو کوچک‌تر از ۶۰ درجه دارد که با توجه به نیازمندی آنتن ماهواره مناسب می‌باشد.



شکل ۲- سطح مقطع مؤثر اشکال مختلف آرایه همدیس [6]

Figure 2- Effective area for different conformal array shapes [6]

می‌باشد که بایستی براساس الزامات فنی و ماموریتی ماهواره این پارامترها مورد تحلیل قرار گیرند.

در ادامه یک آنتن آرایه‌ای مسطح مثلثی برای به‌کارگیری در ساختارهای همدیس به‌عنوان یک زیرآرایه ارائه شده است. این زیرآرایه پیشنهادی با بهره ۱۴/۳ dBi قابلیت به‌کارگیری در یک ساختار همدیس را به‌خوبی به‌دست می‌دهد. مسطح بودن این زیرآرایه، فشردگی، سادگی و هزینه ساخت کم آن را می‌توان به‌عنوان سایر قابلیت آن به‌شمار آورد.

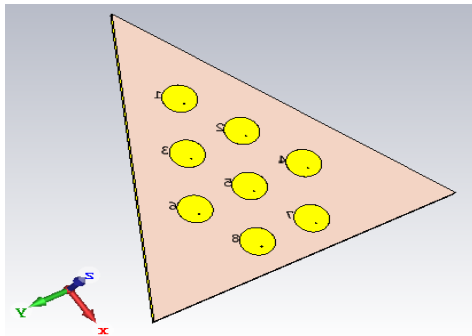
### طراحی و شبیه‌سازی آرایه

در این بخش، طراحی و شبیه‌سازی یک زیرآرایه صفحه‌ای برای استفاده در ساختار آنتن آرایه‌ای مورد بحث در بخش قبل ارائه شده است. ابتدا به‌منظور شبیه‌سازی تمام موج آرایه‌ها یک آنتن پیچ در باند X طراحی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، زیرآرایه آنتن پیچ بر روی زیرآرایه مثلثی RO4003 با ارتفاع ۳۰ mil پیاده شده است. آنتن توسط یک کابل هم‌محور به‌صورت عمودی

شکل (۲) سطح مقطع مؤثر اشکال مختلف آرایه همدیس نسبت به تغییرات جهت پرتو آرایه را نشان می‌دهد [6]. اشکال بررسی شده از لحاظ تغییرات شیب و میزان خمیدگی با هم تفاوت دارند. در این اشکال مصالحه‌ای بین عملکرد آرایه و جهت چرخش پرتو آرایه وجود دارد. این شکل بیان‌کننده میزان پوشش در جهتهای مختلف برای اشکال متفاوت با قاعده یکسان و با فرض  $h/R=1$  است. سطح مقطع مؤثر آرایه صفحه‌ای

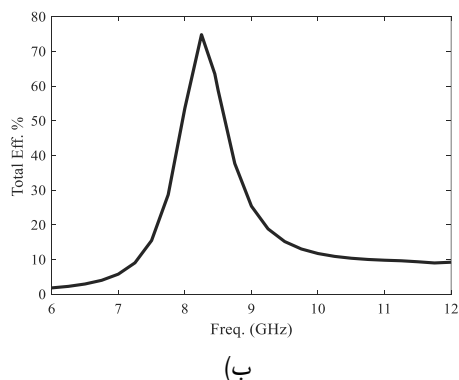
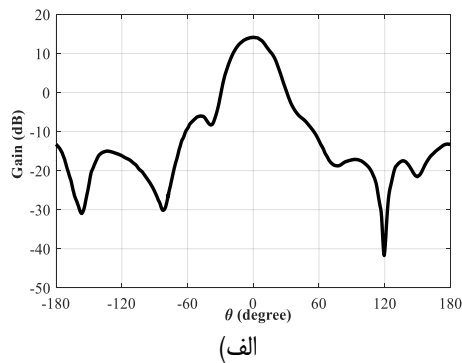
با توجه به محدودیت فضا در ماهواره‌ها، حالتی که بیش‌ترین سطح مقطع مؤثر و کم‌ترین مساحت کل را داشته باشد، بهترین انتخاب به‌شمار می‌رود. بر اساس این شکل مخروط نتایج بهتری را نشان می‌دهد. یکی از مزایای مخروط، داشتن شیب ثابت در تمام سطح است که ساخت و پیاده‌سازی آرایه و تجمع آن با شبکه تغذیه را ساده‌تر می‌کند. از سوی دیگر استفاده از شکل مخروط به دلیل انحنای پیوسته سطح بیرونی، نیازمند طراحی و ساخت المان‌های آنتنی با سطح همدیس می‌باشد. این موضوع و نیز ساخت شبکه تغذیه متناسب، محدودیت‌های زیادی در طراحی و ساخت آنتن ایجاد می‌کند. به همین جهت، استفاده از شکل چند وجهی به‌جای مخروط راه‌حل مناسبی خواهد بود. در ساختار چند وجهی، صفحه‌های دربرگیرنده یک یا چند المان آنتنی در کنار هم، شکل هندسی نزدیک به مخروط را به‌دست می‌دهند. تعداد وجوه ساختار هندسی آنتن، به سطح مقطع در اختیار، ابعاد تک المان و زاویه مخروط مرتبط است. انتخاب این پارامترها در بهره آنتن و محدوده جستجوی بیم آن نیز مؤثر

جهت افزایش بهره آنتن، لازم است که در هر وجه از ساختار چند وجهی، تعداد المان‌های بیشتری به صورت آرایه قرار بگیرند. در همین راستا، ساختار آرایه‌ای با ۸ المان در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به محدودیت ابعاد در ماهواره‌ها، فضای در اختیار آنتن و شبکه‌ی تغذیه آن نیز محدود است، بنابراین امکان استفاده از تعداد المان‌های بیشتر وجود ندارد. شکل مثلی چنین المان‌ها نیز امکان توسعه و ایجاد یک آنتن چند وجهی را فراهم می‌کند.



شکل ۵- ساختار آرایه صفحه‌ای با ۸ المان

Figure 5- 8-element plate array structure

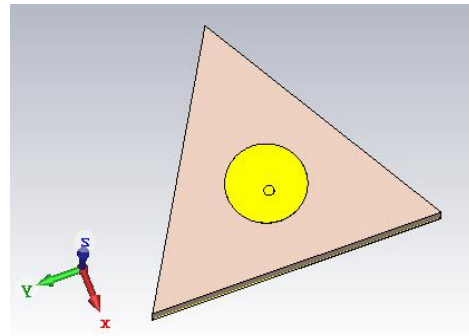


شکل ۶- الف) بهره آرایه صفحه‌ای در  $\phi=0$  ب) بازدهی آنتن

Figure 6- a) Plate array gain for  $\phi=0$ , b) Antenna efficiency

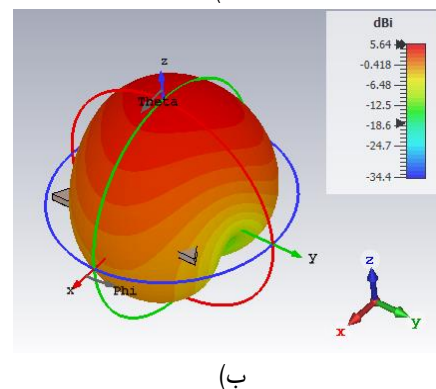
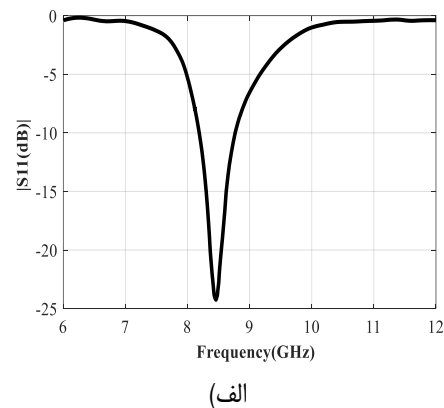
نمودار الگوی تشعشعی و بازدهی آنتن در شکل (۶) نشان داده شده است. بهره زیر آرایه در فرکانس ۸/۴۵ GHz برابر با ۱۴/۳ dBi است. از آن جاکه

تغذیه می‌شود. ضریب انعکاس این آنتن و پترن تشعشعی سه بعدی آن در شکل (۳) آمده است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST انجام شده است. با توجه به شکل (۴-الف)، فرکانس مرکزی این آنتن ۸/۵ GHz است و پهنای باند ضریب انعکاس ۱۰ dB - آنتن حدود ۶۰ MHz است. این آنتن دارای حداکثر بهره ۵/۶۴ dBi است و بهره آن در  $\theta = 0^\circ$  حدود ۵/۴ dBi است.



شکل ۳- آنتن پیچ طراحی شده در باند X با زیرلایه مثلی شکل

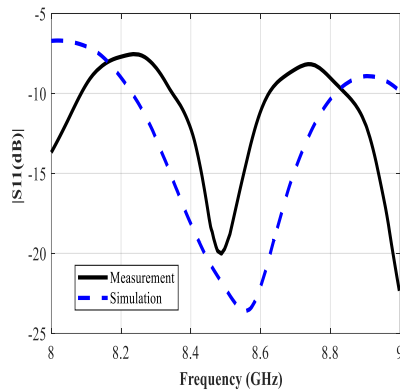
Figure 3- Patch antenna designed in X-band with triangular sub-layers



شکل ۴- الف) نمودار تلفات بازگشتی آنتن تک المان ب) الگوی تشعشعی سه‌بعدی در فرکانس ۸/۵GHz

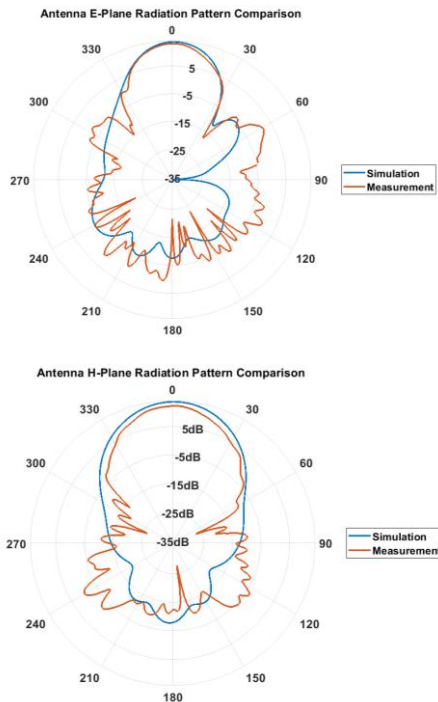
Figure 4- a) Return loss diagram of single element antenna, b) 3D radiation pattern in 8.5 GHz frequency.

زیرآرایه نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است. تفاوت مشاهده شده در نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، مرتبط با ملاحظات و دقت‌های ساخت می‌باشد. لازم به ذکر است که برای سهولت ساخت و کاهش هزینه‌ها، از برد چندلایه استفاده نشده است و بردها به صورت مجزا ساخته شده و روی هم قرار گرفته‌اند. در واقع این تفاوت به دلیل کیفیت ساخت و عدم دقت کافی برای اتصال و مونتاژ شبکه تغذیه به المان‌های آنتنی و ایجاد فاصله هوایی بین آنتن و شبکه تغذیه است که در شبیه‌سازی به سادگی قابل اعمال نمی‌باشد. همچنین برای تنظیم بردها بر روی هم، از پیچ‌های پلاستیکی استفاده شده است.



شکل ۹- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آرایه

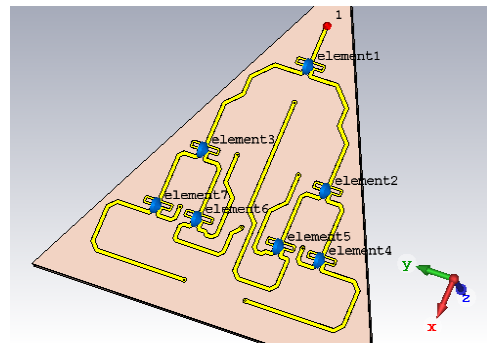
Figure 9- Comparison of array simulation and its measurement results



شکل ۱۰- مقایسه الگوی تشعشی آرایه حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

Figure 10- Comparison of the radiation pattern obtained from simulation and measurement results

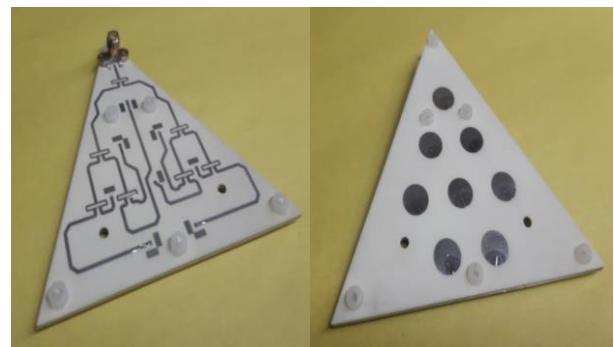
بهره تک المان ۵/۴ dBi است با ۸ برابر کردن تعداد المان‌ها بهره آرایه حدود ۹ dB افزایش یافته است که با تئوری آرایه‌ها همخوانی دارد. به منظور تغذیه این آرایه، از تقسیم‌کننده شناخته شده توان ویلکینسون ۸ مسیره استفاده می‌شود. ابتدا یک تقسیم‌کننده توان ویلکینسون ساده طراحی شده و سپس با ترکیب چند تقسیم‌کننده، یک تقسیم‌کننده ویلکینسون ۸ مسیره ایجاد می‌گردد. به منظور کاهش هزینه ساخت المان‌های آرایه صفحه‌ای به صورت یک نواخت و هم‌فاز تحریک شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، برای کاهش سطح مقطع شبکه تغذیه و رساندن آن به محل قرارگیری المان‌های آنتنی، از خم کردن خطوط انتقال استفاده شده است.



شکل ۷- شبکه تغذیه آرایه صفحه‌ای

Figure 7- Feeding network of the plate array

شکل (۸) برد مدار چاپی ساخته شده شبکه تغذیه و آرایه طراحی شده را نشان می‌دهد. اتصال خطوط تغذیه به آنتن‌ها نیز به صورت عمودی انجام شده است. لازم به ذکر است که اگرچه پلاریزاسیون این زیرآرایه خطی است، اما برای رسیدن به پلاریزاسیون دایروی در ساختار نهایی آنتن همدیس، می‌توان از تغذیه ترتیبی استفاده نمود [۱۱، ۱۲].



شکل ۸- ساختار آنتن آرایه‌ای و شبکه تغذیه متناظر

Figure 8- Array antenna structure and corresponding feeding network

نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ضریب انعکاس ورودی آنتن در شکل (۹) نشان داده شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پترن تشعشی

*IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 2, pp. 598-605, 2012, <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2220328>.

- [5] A. Cawthorne, M. Beard, A. Carrel, G. Richardson, and A. Lawal, "Launching 2009: the nigeriasat-2 mission-high-performance earth observation with a small satellite," in *22nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2008.
- [6] L. Josefsson and P. Persson, *Conformal Array Antenna Theory and Design*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.
- [7] H. Xu, J. Cui, J. Duan, B. Zhang, and Y. Tian, "Versatile conical conformal array antenna based on implementation of independent and endfire radiation for UAV applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 31207-31217, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903198>.
- [8] G. Knittel, "Choosing the number of faces of a phased-array antenna for hemisphere scan coverage," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 13, no. 6, pp. 878-882, 1965, <https://doi.org/10.1109/TAP.1965.1138580>.
- [9] A. da Silva Curriel, A. Carrel, A. Cawthorne, L. Gomes, M. Sweeting, and F. Chizea, "Commissioning of the nigeriasat-2 high resolution imaging mission," in *26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2012.
- [10] A. K. Aboul-Seoud, A. D. S. Hafez, A. M. Hamed, and M. Abd-El-Latif, "A conformal conical phased array antenna for modern radars," in *2014 IEEE Aerospace Conference*, 2014, pp. 1-7, IEEE, <https://doi.org/10.1109/AERO.2014.6836483>.
- [11] J. Huang, "A technique for an array to generate circular polarization with linearly polarized elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 9, pp. 1113-1124, 1986, <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143953>.
- [12] H. Iwasaki, T. Nakajima, and Y. Suzuki, "Gain improvement of circularly polarized array antenna using linearly polarized elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 6, pp. 604-608, 1995, <https://doi.org/10.1109/8.387176>.

این آنتن برای فرکانس کاری ۸/۴۵ GHz طراحی شده است. با توجه به شکل ۶ پهنای باند تطبیق فرکانسی این آنتن از ۸/۳۵ GHz تا ۸/۴۵ GHz مناسب می‌باشد. بهره تشعشی این آنتن در فرکانس ۸/۴۵ GHz نیز در حدود ۱۴/۳ dB می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله یک زیرآرایه آنتنی با بهره بالا برای به‌کارگیری در لینک ارسال داده تصویربرداری ماهواره طراحی شده است. زیرآرایه مثلی پیشنهادی که قابلیت به‌کارگیری در ساختار آنتن همدیس را دارد، از دو بخش مجزای شبکه تغذیه و المان‌های تشعشع‌کننده تشکیل شده است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان‌گر آن است که با زیر آرایه تعریف شده، بهره ۱۴/۳ dBi به‌دست می‌آید.

### تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### مراجع

- [1] S. Gao, Y. Rahmat-Samii, R. E. Hodges, and X.-X. Yang, "Advanced antennas for small satellites," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 3, pp. 391-403, 2018, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2804664>.
- [2] A. Makovsky, P. Ilott, and J. Taylor, "Mars science laboratory telecommunications system design," *DESCANSO Design and Performance Summary Series*, California: NASA, Art. no. 14, 2009.
- [3] B. P. Kumar, C. Kumar, V. S. Kumar, and V. V. Srinivasan, "Active spherical phased array design for satellite payload data transmission," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4783-4791, 2015, <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2479678>.
- [4] C. Kumar, B. P. Kumar, V. S. Kumar, and V. V. Srinivasan, "Dual circularly polarized spherical phased-array antenna for spacecraft application,"