

## **Design, Simulation, and Fabrication of High Power Radial Line Slot Array Antennas**

**F. Mohammadzadeh, A. Hassani\* , M. Khalaj Amirhosseini**

\* Assistant Professor, Imam Hossein University (AS), Tehran, Iran

(Received: 15/12/2021; Accepted: 07/05/2022)

### **Abstract**

*Radial linear slotted array antennas are slotted waveguide antennas. These antennas are highly efficient and are used to produce circular polarization. In this paper, a slow wave structure is used to increase the tolerable power of the antenna. The use of this structure creates a two-level radial linear slot array antenna. On the slow wave structure, there is a slot plate that is fed by this structure. Both slots perpendicular to each other (to create circular polarization) form a unit of radiation. Radiation units are distributed on a spiral path at regular intervals. This antenna is designed, simulated, and built to operate at a frequency of 9.45 GHz and a radius of 270 mm. According to the simulation results, the reflection coefficient is -18.93 dB, the radiation efficiency is more than 93% and the aperture efficiency is 28.5%. The evaluation of the value of the reflection coefficient for a sample made in the range of 9.385 GHz to 9.417 GHz is less than -10 dB.*

**Keywords :** Radial Linear Slot Array Antenna (RLSA), High Power Microwave (HPM), Radial Waveguides, Slow-Wave Structures (SWS).

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors



---

\* Corresponding author E-mail: Kpahasani@ihu.ac.ir

## طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی توان بالا

فلاح محمدزاده<sup>۱</sup>، علی حسینی<sup>۲\*</sup>، محمد خلیج امیرحسینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۳- استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

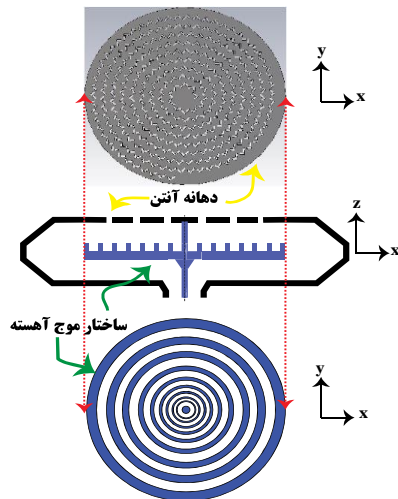
(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷)

### چکیده

آنتن‌های آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی<sup>۱</sup> از نوع آنتن‌های موجبری شکاف‌دار هستند. این آنتن‌ها بازدهی بالایی دارند و برای تولید قطبش دایروی به کار می‌روند. در این مقاله از یک ساختار موج آهسته<sup>۲</sup> برای افزایش توان قابل تحمل آنتن استفاده شده است. استفاده از این ساختار باعث ایجاد یک آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی دو طبقه می‌شود. روی ساختار موج آهسته، صفحه شکاف‌ها قرار دارد که به وسیله همین ساختار تغذیه می‌شوند. هر دو شکاف عمود بر هم (برای ایجاد قطبش دایروی) یک واحد تشعشع را تشکیل می‌دهند. واحدهای تشعشع روی یک مسیر حلزونی به فواصل مشخص از هم توزیع شده‌اند. این آنتن برای کار در فرکانس مرکزی ۹/۴۵ گیگاهرتز و شعاع ۲۷۰ میلی‌متر طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. طبق نتایج شبیه‌سازی مقدار ضریب بازتاب ۱۸/۹۳- دسی‌بل، بازدهی تشعشعی بیش از ۹۳ درصد و بازدهی دهانه حدوداً ۲۸/۵ درصد است. مقدار ضریب بازتاب برای نمونه ساخته شده در بازه ۹/۳۸۵ گیگاهرتز تا ۹/۴۱۷ گیگاهرتز کمتر از ۱۰- دسی‌بل است. مقدار بهره برای این آنتن ۲۹/۱ دسی‌بل، نسبت محوری کمتر از ۳ دسی‌بل و توان قابل تحمل آن ۱۲۳/۴ مگاوات تعیین شده است.

**کلیدواژه‌ها:** آنتن آرایه‌ای خطی شعاعی شکاف‌دار (RLSA)، امواج مایکروویو توان بالا (HPM)، موجبرهای شعاعی، ساختارهای موج آهسته (SWS)

پایین تغذیه می‌شود [۴]. شکل (۱) نمایی کامل از ساختار این آنتن را نشان می‌دهد.



شکل (۱). نمایی کامل از ساختار

آرایه‌ای از عناصر روی صفحه بالایی قرار گرفته‌اند که الگوی تشعشعی<sup>۲</sup> و قطبش موج منتشرشده را کنترل می‌کنند [۵].

این آنتن از نوع آنتن‌های آرایه‌ای صفحه‌ای با بازدهی بالا است که برای تولید قطبش دایروی به کار می‌رود [۶]. آنتن‌های آرایه‌ای

### ۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر امواج مایکروویو توان بالا به‌طور وسیعی در کاربردهای نظامی و غیرنظامی گسترش یافته‌اند. با پیشرفت این امواج، طراحی آنتن‌های آن‌ها نیز بسیار بااهمیت شده است [۱]. با توجه به خصوصیات معین این امواج، آنتن‌های مایکروویو توان بالا باید بتوانند مشخصه‌هایی همچون ظرفیت توان بالای قابل‌دسترس، کوچک بودن ساختار و ایجاد تشعشع مطلوب را برآورده کنند [۲]. بسیاری از منابع این امواج، از قطبش دایروی با مد TM01 و یا مد TEM استفاده می‌کنند. اگر این منابع به‌طور مستقیم به آنتن وصل شوند، پرتو آن‌ها دارای یک صفر در راستای محور اصلی الگو می‌باشند. این حالت برای کاربردهای پرتو توان مناسب نیست؛ در حوزه امواج مایکروویو توان بالا همیشه بحرانی‌ترین مسئله ایجاد امواج با توان‌های بالا در فرکانس‌های بالاتر با عرض پالس‌های پهن‌تر بوده است [۳]. بنابراین تحقیق در حوزه سامانه‌های تشعشعی مایکروویو توان بالا که در فرکانس‌های بالا کار می‌کنند در آینده بسیار حائز اهمیت است. آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی یک موج‌بر با صفحات موازی بی‌نهایت است که به‌وسیله یک پراب در مرکز صفحه

\* رایانامه نویسنده مسئول: Ali.hasani.89@gmail.com

<sup>1</sup> Radial Linear Slot Array (RLSA)

<sup>2</sup> Slow Wave Structure (SWS)

<sup>2</sup> Radiation pattern



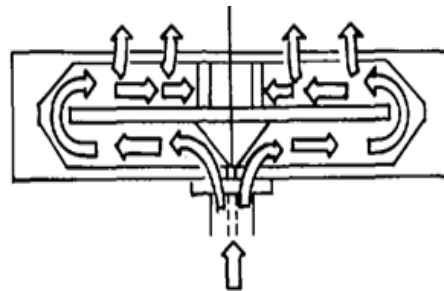
آنتن فشرده شکافدار خطی شعاعی با ساختاری تک‌لایه و شکاف‌های غیریکنواخت را ارائه کردند [۱۴]. در سال ۱۹۹۲ تاکاهاشی<sup>۲</sup> و همکاران یک آنتن شکافدار شعاعی که به‌طور هم‌زمان دو نوع پرتو مدادی در برود سایید و پرتو مخروطی از آن منتشر می‌شود، طراحی و ساختند [۱۵]. تاکاهاشی و همکاران در سال ۱۹۹۵ یک ساختار دولایه برای پخش مستقیم از ماهواره<sup>۳</sup> در فرکانس ۱۲ گیگاهرتز پیشنهاد دادند [۱۶]. آقای دیویس و همکارانش<sup>۴</sup> در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۱۹۹۹ با استفاده از شکاف‌های خنثی‌کننده‌ی بازتاب توانستند ضریب بازتاب را از ۲ تا ۱۰ دسی‌بل بهبود ببخشند [۱۷]. در سال ۲۰۰۰ آکایاما و همکارانش<sup>۵</sup> یک ساختار متشکل از دو دیسک رسانا که بین آن‌ها را یک ماده‌ی عایق پر کرده است، پیشنهاد دادند. آنتن در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز داری بازدهی ۵۰ درصد بود [۷]. در سال ۲۰۰۲ کیم و همکارانش<sup>۶</sup> برای فرکانس ۶۰ گیگاهرتز یک ساختار تک‌لایه که روی یک زیر لایه قرار داشت، ارائه کردند [۱۸]. در سال ۲۰۱۱ گنزالز و همکارانش<sup>۷</sup> یک آنتن آرایه‌ای سبک در باند X برای ارتباطات ماهواره‌ای ثابت پیشنهاد کردند [۱۹]. در سال ۲۰۱۳ ژان‌فنگ و همکارانش در فرکانس ۲۷۰ گیگاهرتز یک ساختار متفاوت ارائه کردند [۲۰]. در سال ۲۰۱۳ نگیون و همکاران<sup>۸</sup> یک آرایه‌ی شکافدار خطی شعاعی با صفحات موازی و ساختار لانه‌زنبوری طراحی کردند. این آنتن برای استفاده در ماهواره طراحی شد. این آنتن دارای قطر ۰/۹ متر، وزن ۱/۶ کیلوگرم و در فرکانس ۳۲ گیگاهرتز بهره‌ی ۴۴/۶ دسی‌بل را در اختیار می‌گذاشت [۲۱]. در سال ۲۰۱۶ آقای یوان و همکارانش<sup>۹</sup> برای بهبود توان قابل‌دسترس آنتن، یک ساختار موج آهسته‌ی خطی شعاعی جایگزین روش قدیمی صفحات دی‌الکتریک کردند [۱۱].

افزایش پهنای باند، بهبود مقدار ضریب بازتاب در فرکانس مرکزی و افزایش بهره، کاهش پیچیدگی تحلیل و ساخت از طریق حذف ساختار حذف بازتاب نسبت به نمونه‌های کلاسیک از جمله نوآوری‌های این ساختار است.

در این مقاله تحلیل ریاضی یک آنتن آرایه‌ای شکافدار خطی شعاعی ارائه شده است. در ادامه طراحی کامل یک آنتن آرایه‌ای شکافدار خطی شعاعی برای کار در یک فرکانس خاص انجام شده است. سپس طراحی انجام شده در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است و در نهایت پس از ساخت یک نمونه، نتایج ارزیابی آن با نمونه شبیه‌سازی شده آورده شده است.

شکافدار خطی شعاعی به‌صورت تک‌لایه و دولایه ساخته می‌شوند [۷]. در نوع تک‌لایه شکاف‌ها غیریکنواخت بوده و به‌وسیلهٔ امواج شعاعی بیرون رونده تحریک می‌شوند [۸] ولی در نوع دولایه شکاف‌ها یکنواخت و به‌وسیلهٔ امواج رونده به سمت مرکز آنتن تحریک می‌شوند [۹]. منبع تغذیه الکترومغناطیس یک مبدل کواکسیال به موج‌بری با مود TEM است که در مرکز صفحه پایینی قرار دارد [۹]. شکاف‌ها بر روی صفحه بالایی به‌صورت جفت المان‌های تشعشی قرار دارند که هریک از این زوج شکاف‌ها سازنده‌ی قطبش دایروی بوده و مجموع این آرایه‌ها بر روی یک مسیر حلزونی قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۱].

با چیدمان مختلف شکاف‌ها بر روی سطح روزه می‌توان اهداف مختلفی را دنبال کرد که هر یک منجر به ایجاد مزایا و معایب خاصی می‌شوند. با توجه به نحوه‌های چیدمان مختلف شکاف‌ها و نحوه‌ی تغذیه می‌توان پرتوهای مختلفی را دریافت کرد. از این میان می‌توان به دو گونه‌ی پرتو باریک (پرتو مدادی) در راستای عمود بر صفحه و پرتو مخروطی، اشاره نمود [۶]. شکل (۲) مسیر و نحوهٔ شارش توان در یک آنتن آرایه‌ای شکافدار خطی شعاعی دو طبقه را نشان می‌دهد. زمانی که امواج به انتهای موج‌بر رسیدند، از طریق یک خم الکتریکی ۱۸۰ درجه به سمت مرکز موج‌بر طبقه دوم تغییر مسیر می‌دهند [۱۲]. سپس مقداری از این انرژی از طریق شکاف‌های سطح موج‌بر طبقه دوم تشعشع می‌کند (امواج از موج‌بر خارج می‌شوند).



شکل (۲). شارش توان از آنتن شکافدار خطی شعاعی دو طبقه [۱۲]  
خم الکتریکی ۱۸۰ درجه و مبدل کواکسیال به موج‌بر شعاعی، دو قسمت بسیار مهم در کاهش ضریب بازتاب ساختار هستند [۹].  
در سال ۱۹۶۴ کلی و گابلز<sup>۱</sup> یک آنتن با آرایه‌ای از شکاف‌ها که بر روی دوایر متحدالمرکز قرار داشتند، طراحی کردند. این آنتن در باند فرکانسی ۱۰/۲ تا ۱۰/۸ گیگاهرتز امواجی را با قطبش دایروی راست‌گرد تولید می‌کرد [۱۳].

در [۱۲] دو نمونه از این نوع آنتن با ابعاد مختلف و در نظر گرفتن توزیع میدان‌های مختلف طراحی شده است و نتایج آزمون آن‌ها آورده شده است. یک سال بعد یعنی در سال ۱۹۸۶ همین گروه طرح یک

<sup>2</sup> M. Takahashi, J. Takada, N. Goto

<sup>3</sup> Direct Broadcast from Satellite (DBS)

<sup>4</sup> Davis et al

<sup>5</sup> Akiyama et al

<sup>6</sup> Kim et al

<sup>7</sup> Gonzalez et al

<sup>8</sup> Nguyen et al

<sup>9</sup> Yuan, Cheng-Wei et al

<sup>1</sup> Kelly and Goebel

## ۲- تحلیل آنتن

$$E_{F\varphi}(\theta, \varphi) =$$

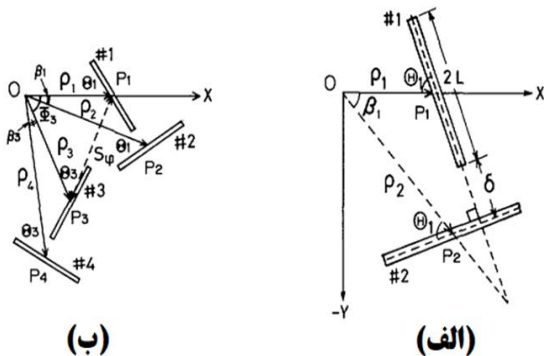
$$-\frac{jk}{2} \sum_{n=1}^M L_n W_n E_{0n} e^{jk\rho_n \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_n)} \cos\theta \quad (4)$$

$$\times \cos(\varphi - \varphi_n - \beta_n) \frac{\cos X_n}{(X_n)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \frac{\sin Y_n}{Y_n}$$

۲-۱- طراحی شکاف‌ها برای داشتن پرتو مدادی<sup>۳</sup> با قطبش دایروی

در این نوع آرایه طراحی دو بخش دارد [۶، ۱۲]. ابتدا یک جفت شکاف (واحد تشعشع) طراحی شده و سپس بقیه‌ی جفت شکاف‌ها پشت سر هم قرار خواهند گرفت. در این شیوه تنها یک حالت موج رونده داخل شونده وجود دارد. در این حالت تغییرات دامنه میدان قابل چشم‌پوشی است ولی باید اختلاف فاز آن که به میزان  $H_n^{(1)}(k\rho)$  می باشد را لحاظ کرد. همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، شکاف‌ها از ۱ تا N شماره‌گذاری شده‌اند.

با توجه به این شکل پارامتر  $\rho_n$  فاصله‌ی مرکز هر شکاف تا مبدأ ساختار (که روی بردار  $P_n$  مربوط به شکاف n - ام قرار دارد) را نشان می‌دهد. پارامتر  $\beta_{n-1}$  زاویه بین دو بردار  $P_{n-1}$  و  $P_n$  را نشان می‌دهد. پارامتر  $\Theta_{n-1}$  زاویه چرخش شکاف نسبت به راستای شعاع،  $2L$  طول شکاف‌ها و  $\delta$  فاصله‌ی بین دو شکاف در یک واحد تشعشع را نشان می‌دهد [۱۲]. در طراحی‌ها برخی از این پارامترها را می‌توان ثابت در نظر گرفت. برای مثال می‌توان پارامترهای طول شکاف‌ها و فاصله‌ی بین آن‌ها در یک واحد تشعشع را ثابت در نظر گرفت.



شکل (۳). مختصات و پارامترهای طراحی چیدمان شکاف‌ها، الف- واحد تشعشع اول، ب- واحد تشعشع اول و دوم [۱۲]

همان‌طور که در شکل (۳- الف) مشاهده می‌شود، شکاف‌های شماره‌ی ۱ و ۲ که مربوط به واحد تشعشع اول هستند، برهم عمود

در این قسمت تجزیه و تحلیل کاملی برای الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای خطی شعاعی ارائه خواهد شد. از آنجایی که همه شکاف‌ها دارای جهت و مکان متفاوت هستند، نمی‌توان از اصل «ضرب الگو» برای به دست آوردن الگوی تشعشعی آنتن استفاده نمود [۲۲].

اصل ضرب الگو که در آنتن‌های آرایه‌ای با المان‌های تشعشعی یکسان استفاده می‌شود، برای محاسبه الگوی تابشی یک آنتن آرایه‌ای از ضرب فاکتور آرایه<sup>۲</sup> در میدان یک المان، استفاده می‌شود [۲۳]. در اینجا ابتدا باید الگوی تابشی (تشعشعی) یک شکاف منفرد در نقطه و جهت دلخواه را به دست آورد و سپس اثر همه شکاف‌ها را با هم جمع کرد. در سیستم مختصات  $\{\hat{s}\}$  برای یک آرایه با M شکاف (هر شکاف در نقطه و جهت دلخواه قرار دارد) الگوی تشعشعی به صورت رابطه (۱) و (۲) نوشته می‌شود [۲۴، ۲۵].

$$E_{\theta}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^M E_{\theta}^n(r, \theta, \varphi)$$

$$= \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^M E_{\theta}^n(\theta, \varphi) \quad (1)$$

$$= E_{F\theta}(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

$$E_{\varphi}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^M E_{\varphi}^n(r, \theta, \varphi)$$

$$= \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^M E_{\varphi}^n(\theta, \varphi) \quad (2)$$

$$= E_{F\varphi}(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

که در آن:

$$E_{F\theta}(\theta, \varphi) =$$

$$-\frac{jk}{2} \sum_{n=1}^M L_n W_n E_{0n} e^{jk\rho_n \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_n)} \quad (3)$$

$$\times \sin(\varphi - \varphi_n - \beta_n) \frac{\cos X_n}{(X_n)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \frac{\sin Y_n}{Y_n}$$

<sup>3</sup> Pencil Beam

<sup>1</sup> Pattern Multiplication

<sup>2</sup> Array Factor

بزرگ بودن آرگومان تابع هنکل یعنی  $k\rho \gg 1$  برقرار باشد، رابطه (۹) به صورت (۱۰) بازنویسی خواهد شد.

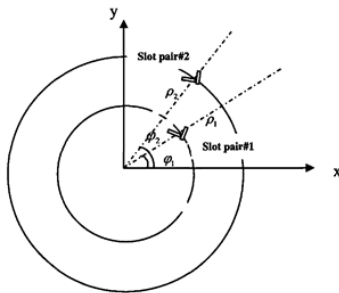
$$\rho_3(\psi) = \rho_1 + \frac{\lambda_g}{2\pi} \psi \quad (10)$$

معادله ی (۱۰) رابطه‌ی تابع حلزونی است؛ بنابراین شکافها بر روی یک مسیر حلزونی قرار خواهند گرفت [۱۲]. چون  $s_p \approx \lambda_g$  باشد [۱۲]. اگر مقدار  $s_p$  را ثابت در نظر بگیریم بنابراین تمامی واحدهای تشعشعی (جفت شکافها) با چگالی تقریباً یکسانی در هر سطحی از دهانه آنتن قرار می‌گیرند، بطوریکه در هر سطحی به‌اندازه‌ی  $s_p \times s_p$  فقط یک واحد تشعشعی قرار می‌گیرد.

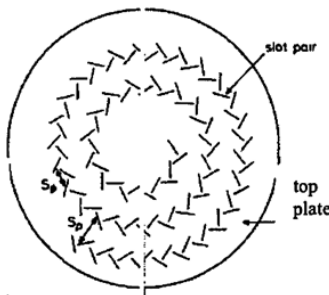
در نهایت رابطه‌ی مسیر چیدمان شکافها برای آنتن موضوع این مقاله به‌صورت رابطه‌ی (۱۱) خواهد بود. لازم به توضیح است که مقدار زاویه  $\varphi$  از بازه  $[0, 7.5 \times 2\pi]$  به‌صورت ضریبی از  $2\pi$  انتخاب می‌شود. اگر لازم شود تعداد شکافها افزایش یابد، باید تعداد دوره‌های مسیر حلزونی را افزایش داد [۱۲].

$$p(\varphi) = \rho_0 + \varphi \frac{\lambda_g}{2\pi}, \quad [0, 7.5 \times 2\pi] \quad (11)$$

که در آن  $\rho$  فاصله‌ی شعاعی اولین المان تشعشعی از مرکز آنتن است. شکل (۴) نحوه‌ی محاسبه‌ی شعاع مسیر حلزونی را نشان می‌دهد و شکل (۵) نیز نتیجه‌ی نهایی چیدمان شکافها را نشان می‌دهد.



شکل (۴). محاسبه‌ی مسیر چیدمان شکافها [۲۷]



شکل (۵). نمایی از چیدمان شکافها روی مسیر حلزونی [۲۷]

هستند تا قطبش دایروی ایجاد کنند [۵]. هر دو شکاف نیز دارای یک زاویه چرخش یکسان هستند ( $\Theta$ ) و در نتیجه با یک دامنه تحریک می‌شوند؛ بنابراین اگر این دو شکاف با اختلاف فاز نسبی نود درجه نسبت به هم تحریک شوند، یک واحد تشعشعی با قطبش دایروی را ایجاد می‌کنند. رابطه (۵) شرط ایجاد قطبش دایروی را بیان می‌کند [۱۲].

$$\arg[H_1^{(1)}(k\rho_2)] - \arg[H_1^{(1)}(k\rho_1)] = \pi/2 \quad (5)$$

علاوه بر رابطه (۵) از نقطه نظر هندسی روابط (۶) و (۷) نیز برقرار هستند.

$$\rho_2 \sin \Theta_1 - \rho_1 \cos \Theta_2 = L + \delta \quad (6)$$

$$\beta_1 = 2\Theta_1 - \pi/2 \quad (7)$$

روابط (۶) تا (۷) در واقع یک دستگاه سه معادله و چهار مجهول است. اگر مقدار شعاع محل قرارگیری شکاف اول ( $\rho_1$ ) دلخواه در نظر گرفته شود، بقیه‌ی پارامترها با حل دستگاه حاصل، محاسبه خواهند شد. معمولاً مقادیر اولیه را طوری در نظر می‌گیرند که  $\beta_1 = 0$ ,  $\Theta_1 = \pi/2$  باشد [۶]. در مرحله ی بعد محل قرارگیری جفت شکافهای بعدی تعیین می‌شود. شکل (۳-ب) پارامترهای  $\rho_r$ ,  $\Phi_r$  را که به ازای مقادیر  $\rho_3$  و  $s_p$  محاسبه می‌شوند

را نشان می‌دهد. به‌منظور ایجاد یک پرتو مناسب در قسمت مقابل آنتن با قطبش دایروی، باید مشخصات هندسی جفت شکافها همچون زاویه دوران آنها ( $\Phi_r$ ) مقدار مشخص و معینی داشته باشد تا همگی فاز الکتریکی یکسانی داشته باشند. لازم به ذکر است که رابطه (۹) با توجه به هندسه چیدمان شکافها نوشته شده است.

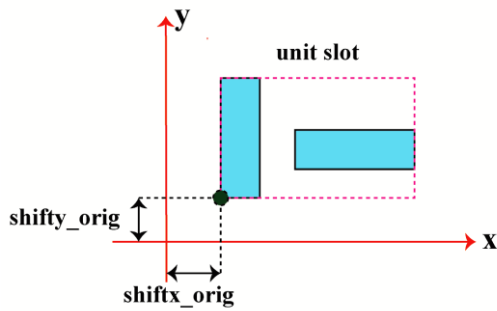
با استفاده از رابطه‌ی (۶) مقدار  $\rho_r$  محاسبه می‌شود. سپس مقدار  $\Phi_r$  با کمک رابطه‌ی (۸) تعیین و در نهایت مقدار  $\rho_r$  و سپس با استفاده از رابطه (۹) مقدار  $\rho_r$  محاسبه می‌شود. با تعیین مقدار  $\rho_r$  می‌توان با استفاده از روابط (۵) تا (۷) مقادیر  $\beta_r$  و  $\Theta_r$  را محاسبه کرد. همچنین با داشتن مقادیر  $\rho_r$  و  $\Phi_r$  را می‌توان با استفاده از روابط (۸) و (۹) محاسبه کرد [۲۶].

$$\Phi_3 = \arg[H_1^{(1)}(k\rho_3)] - \arg[H_1^{(1)}(k\rho_1)] \quad (8)$$

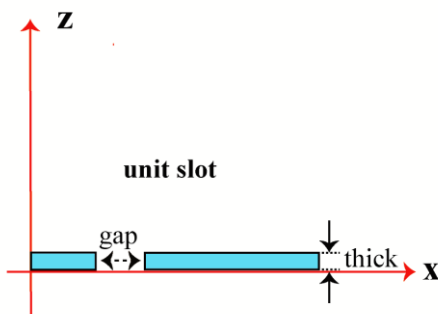
$$s_p^2 = \rho_1^2 + \rho_3^2 + 2\rho_1\rho_3 \times \cos\left\{\arg[H_1^{(1)}(k\rho_2)] - \arg[H_1^{(1)}(k\rho_1)]\right\} \quad (9)$$

از آنجایی که تغییرات  $\Theta_n$  بسیار کم است در نتیجه شکافها در راستای شعاعی جریان تقریباً انتشار یکسانی خواهند داشت. اگر شرط

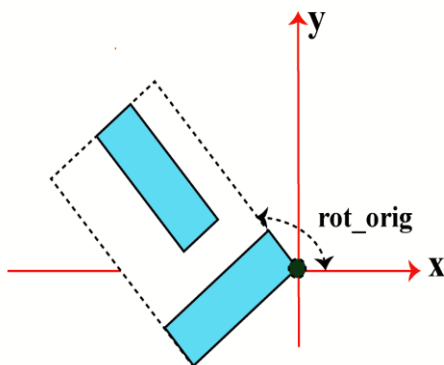
### ۳- طراحی آنتن آرایه‌ای خطی شعاعی توان بالا در فرکانس ۹/۴۵ گیگاهرتز



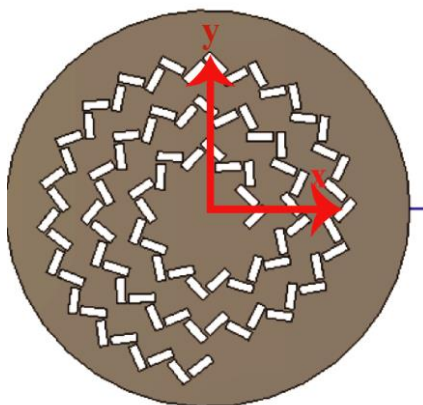
شکل (۷). مختصات مبدأ واحد تشعشع



شکل (۸). ضخامت واحد تشعشع



شکل (۹). چرخش واحد تشعشع حول مبدأ



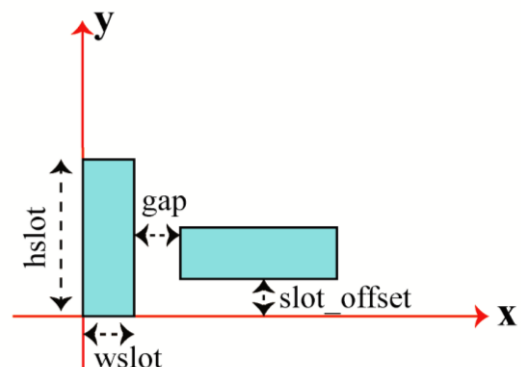
شکل (۱۰). نحوه توزیع واحد تشعشع

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز بیان شد، در ساختارهای دولایه<sup>۱</sup>، سه صفحه موازی برای ایجاد یک راستای موج‌بری شعاعی دوطبقه بر روی هم با فواصل معین قرار می‌گیرند. توان ورودی در مرکز لایه پایین توسط یک کابل هم‌محور به داخل طبقه پایین موج‌بر وارد می‌شود و یک موج شعاعی خارج شونده تولید می‌کند. در لبه انتهایی موج‌بر، امواج به کمک یک خم به شکاف‌های طبقه‌ای که بر روی صفحه بالایی موج‌بر قرار دارند، هدایت می‌شوند تا آن‌ها را تحریک کنند.

پارامترهای  $S_p$  و  $S_\phi$  مشخصه‌ی فواصل بین شکاف‌های مجاور در راستاهای به ترتیب  $\rho$  و  $\phi$  می‌باشند. در  $S_p$  در حدود یک طول موج موج‌بر است، در حالی که  $S_\phi$  به دلخواه انتخاب می‌شود [۲۸]. در ساختار دولایه این فواصل و همچنین طول شکاف‌ها در کلیه سطح روزنه ثابت و متناسب با تزویج موردنظر برای همان محل است. برای دستیابی به پرتو اصلی در مرکز ساختار، باید اثر ساختار موج آهسته نیز در نظر گرفته شود. بدین ترتیب طول موج موج‌بر به  $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}$  تبدیل می‌شود که در آن  $\epsilon_{eff}$  همان ضریب موج آهسته موج‌بر است. در نهایت در این نوع آنتن‌ها  $S_p$  به اندازه‌ی  $\lambda_g$  می‌شود [۲۸].

#### ۳-۱- واحد تشعشع

در این تحقیق برای داشتن قطبش دایروی از دو شکاف عمود بر هم به عنوان یک واحد تشعشع استفاده شده است [۶]. واحدهای تشعشع روی یک مسیر حلزونی قرار می‌گیرند. مقدار فاصله هر واحد با واحدهای مجاور در جهت شعاع و واحدهای کناری به ترتیب به اندازه‌ی  $S_p$  و  $S_\phi$  است. شکل‌های (۶) تا (۱۰) پارامترهای طراحی واحد تشعشع را نشان می‌دهند. شکل (۱۱) نمایی کلی از نحوه چیدمان شکاف‌ها را نشان می‌دهد.

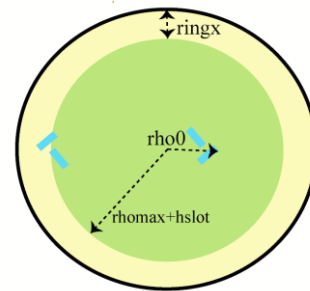


شکل (۶). پارامترهای هندسی واحد تشعشع

<sup>1</sup> Dual Layer Radial Line Slot Antenna (DL-RLSA)

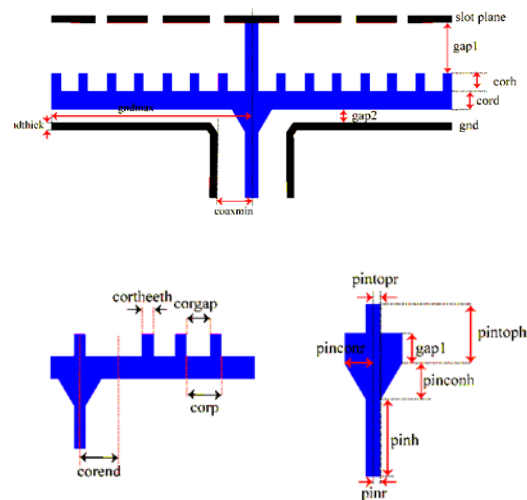
۳-۲- ساختار موج آهسته

در حین کار دستگاه‌های برهم کنش امواج از قبیل تقویت‌کننده‌های موج‌رونده یا شتاب‌دهنده‌های خطی، پرتو الکترون یا یون به طور مؤثر با موج الکترومغناطیس برهم کنش دارند.



شکل (۱۱). پارامترهای صفحه شکافها

برای این منظور لازم است تا ذرات باردار (الکترون‌ها یا یون‌ها) در یک مسافت طولانی با یک میدان کند شده هم فاز نگه داشته شوند. این بدان معنی است که سرعت فاز موج تقریباً با میانگین سرعت ذرات باردار برابر شود [۲۹، ۳۰]. از آنجائی که الکترون‌ها و یون‌ها را فقط می‌توان با سرعت‌هایی کمتر از سرعت نور شتاب‌دار کرد، بنابراین لازم است که ساختارهای الکترومغناطیسی بگونه‌ای طراحی شوند که بتوانند امواج را با سرعت فازی کمتر از سرعت نور در فضای آزاد منتشر کنند [۲۹]. چنین امواجی را، امواج آهسته و ساختارهایی که امواج آهسته در امتداد آن‌ها منتشر می‌شوند را ساختارهای موج آهسته یا سیستم‌های موج آهسته می‌گویند [۲۵، ۲۹]. شکل (۱۲) پارامترهای طراحی ساختار موج آهسته را نشان می‌دهد.



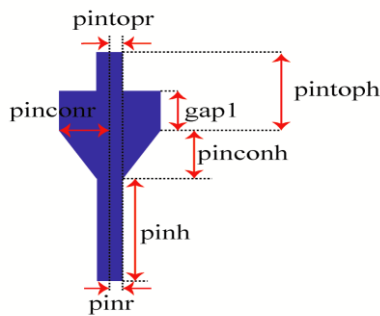
شکل (۱۲). پارامترهای طراحی ساختار موج آهسته

برای از بین بردن پرتوهای مزاحم (گلبرگ مزاحم) ناشی از ساختار آرایه معمولاً موج‌بر طبقه دوم را از مواد دی‌الکتریک پر می‌کنند [۲۸،

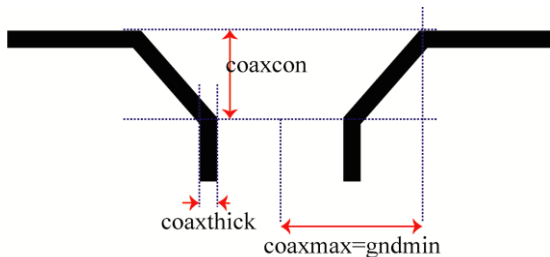
۳۱]. هنگام استفاده از امواج ماکروویو توان بالا شدت میدان الکتریکی در محل اتصالات خیلی زیاد خواهد شد و در نتیجه ماده‌ی دی‌الکتریک دچار شکست خواهد شد. برای افزایش توان قابل تحمل ساختاری متشکل از حلقه‌های متمرکز جایگزین ماده‌ی دی‌الکتریک می‌شود. برای ضریب موج آهسته‌ی مشخص ( $\beta$ ) از تئوری فلوکه در طراحی این ساختار استفاده می‌شود [۹، ۲۹].

۳-۳- ساختار تغذیه آنتن

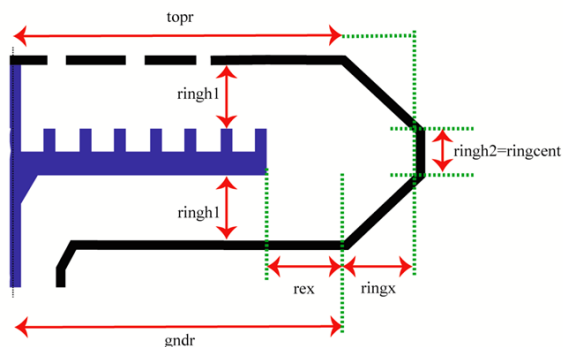
در ساختار تغذیه آنتن، مبدل کابل کواکسیال به موج‌بر شعاعی و خم الکتریکی ۱۸۰ درجه، دو قسمت بسیار مهم در کاهش ضریب بازتاب ساختار هستند [۹]. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) پارامترهای طراحی مبدل و شکل (۱۵) پارامترهای طراحی خم الکتریکی ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳). مغزی مبدل



شکل (۱۴). شیلد مبدل



شکل (۱۵). پارامترهای طراحی خم الکتریکی ۱۸۰ درجه و نحوه قرارگیری در ساختار

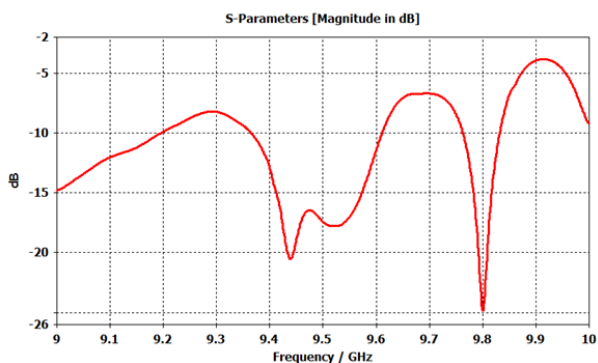
## ۴- شبیه‌سازی و ارزیابی عملی

جدول (۱). معرفی پارامترها و تعیین مقادیر اولیه

عنوان پارامتر	مقدار اولیه (mm)	عنوان پارامتر	مقدار اولیه (mm)	عنوان پارامتر	مقدار اولیه (mm)
lambda	۳۱/۸۴	gap1	۱۰	cormax	۲۸۶
lambdag	۲۸	gap2	۱۰	corh	۳/۵
turns	۸/۵۷	gndmax	۲۸۸	cord	۵
rho0	۳۰	gndmin	۳۰	corp	۷
sphi	۲۸	gndthick	۰	corgap	۴/۵
srho	۲۸	corend	۲۰	corstr	۲۰
arc_max	۸۰۷۸/۳۸	coaxmax	۳۰	cornum	۳۸
nphi	۲۸۹	coaxthick	۱	pinh	۴۹/۵
wslot	۶	coaxmin	۱۶	topr	۲۸۸
hslot	۱۶	coaxconeh	۹/۵	rex	۲
thick	۱	coaxh	۳۰	ringex	۱۰/۹۵
rot_orig	۱۳۵	pintopr	۴	ringh1	۸
gap	۲	pintoph	۱۸/۵	ringh2	۱۲/۵
shifty_orig	۵	pinr	۴	ringhcn	۱۲/۵
shiftx_orig	-۱	pinconer	۱۲	kesi	۰/۸۷۵
slot_offset	۰	pinconeh	۱۱		
corteeth	۲/۵	rhomax	۲۷۰		

## ۵- نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملی

برای انجام شبیه‌سازی‌ها به دلیل ساختار پیچیده هندسی این آنتن، به رایانه‌هایی مجهز به پردازنده‌های پرسرعت نیاز است. شکل (۱۶) نمودار ضریب بازتاب ( $S_{11}$ ) را برای ساختار شبیه‌سازی شده و شکل (۱۸) نیز مقدار این پارامتر را برای نمونه ساخته شده نشان می‌دهد.



شکل (۱۶). نمودار ضریب بازتاب برای ساختار شبیه‌سازی شده در فرکانس

۹/۴۵ گیگاهرتز

معمولاً انرژی‌های مورد استفاده در سامانه‌های ماکروویو توان بالا از نوع پالسی است [۱]. اما در سامانه‌هایی که زمان روشن بودن پالس<sup>۱</sup> بالا است، توان متوسط سیستم افزایش خواهد یافت. افزایش توان متوسط باعث تولید گرما می‌شود. چراکه تلفات در سطوح فلزی خود را به صورت ایجاد گرما نشان می‌دهد. گرمای تولید شده مشکلات زیادی ایجاد می‌کند. برای مثال در زمان تبادل گرما با محیط اطراف، روکش قطعات گرم شده می‌سوزد [۳].

توانی که به گرما تبدیل می‌شود به طور مستقیم با تلفات مواد مرتبط است. معمولاً تلفات در مواد دی‌الکتریک بیشتر از خلأ یا هوا است. در مرجع [۳] همه‌ی تلفات با جریان‌های سطحی تقریب زده شده‌اند. پالس‌های توان بالا مشکلات مختلفی را ایجاد می‌کنند که می‌توان آن‌ها را مستقل از توان متوسط در نظر گرفت. همانند توان متوسط، توان‌های پالسی هم در اثر تلفات باعث ایجاد گرما می‌شوند اما از آنجایی که پالس‌ها طول عمر کوتاهی دارند در نتیجه انرژی آن‌ها خیلی کم خواهد بود؛ بنابراین گرمای یک سیستم بیشتر به توان متوسط آن وابسته است. در عوض پالس‌ها باعث تولید میدان‌های الکتریکی خیلی قوی می‌شوند که می‌تواند قوس‌های الکتریکی (جرقه) ایجاد کند یا باعث شکست هوا شوند.

برای جلوگیری از ایجاد جرقه باید همواره مقدار میدان الکتریکی از مقاومت دی‌الکتریک کمتر باشد [۱]. بیشینه‌ی میدان الکتریکی به چگالی توان موج وابسته است. می‌توان در فاصله‌ی زیادی از منبع و در فضای آزاد برای تخمین چگالی توان نسبت به توان کل از موج تخت استفاده نمود. در آنتن آرایه‌ای خطی شعاعی برای افزایش توان قابل تحمل آنتن دو راه‌کار وجود دارد [۱۱، ۳۲، ۳۳]. استفاده از ساختار موج آهسته و بازطراحی شکاف‌های مورد استفاده در ساختار، راه‌های متداول در افزایش توان قابل تحمل در آنتن هستند [۳۴].

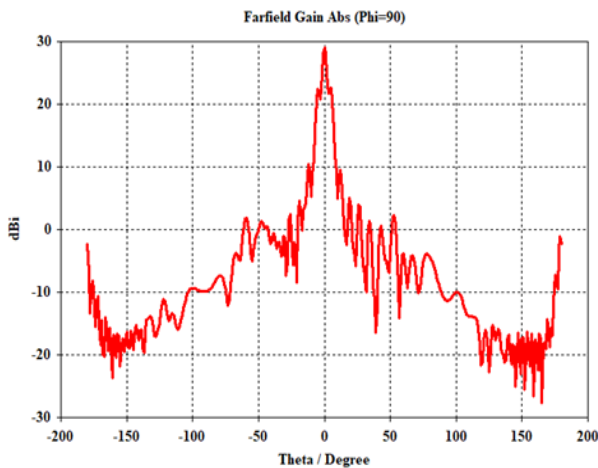
در این مقاله مجموعه‌ی دو شکاف یک واحد تشعشعی خوانده می‌شود. برای طراحی آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی پارامترهای زیادی تعریف شده است که باید محاسبه و سپس برای داشتن بهترین عملکرد بهینه‌سازی شوند. جدول (۱) فهرستی از پارامترهای تعریف شده را ارائه داده است. همه‌ی شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار CST انجام شده است. پارامترها برای عملکرد آنتن در فرکانس ۹/۴۵ گیگا-هرتز طراحی شده‌اند.

<sup>1</sup> Duty Factor

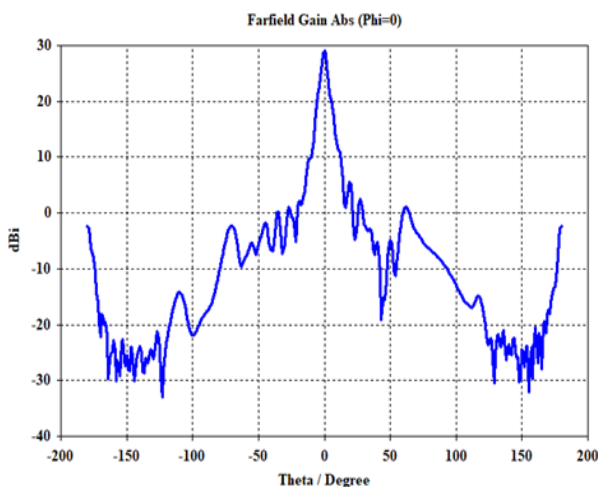




شکل (۱۹). ساختار آنتن آرایه‌ای شکافدار خطی شعاعی توان بالا در فرکانس ۹/۴۵ گیگاهرتز

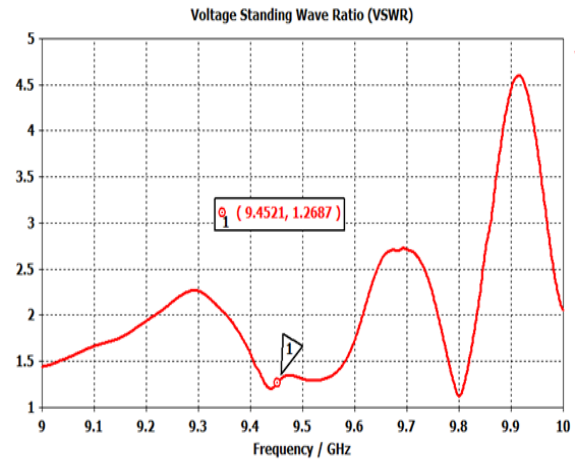


شکل (۲۰). نمودار بهره آنتن در  $\varphi = 90^\circ$  و  $f = 9/45 \text{ GHz}$



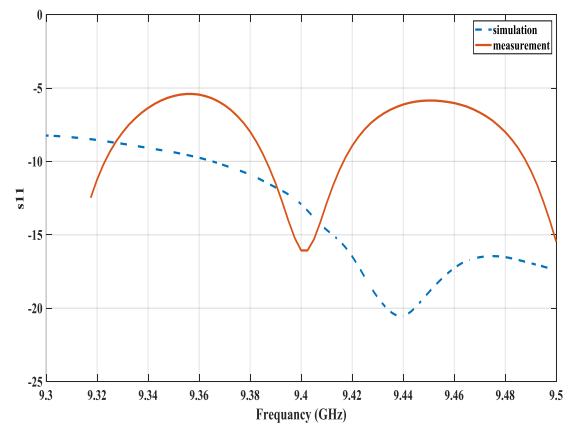
شکل (۲۱). نمودار بهره آنتن در  $\varphi = 90^\circ$  و  $f = 9/45 \text{ GHz}$

همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود، در فرکانس طراحی یعنی فرکانس ۹/۴۵ گیگاهرتز مقدار ضریب بازتاب  $18/93 - \text{dB}$  دسی‌بل است. همچنین پهنای باند شبیه‌سازی شده برای این ساختار  $245/7$  مگاهرتز است. شکل (۱۷) نتایج ارزیابی مقدار نرخ موج ایستای ولتاژ را برای ساختار شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.



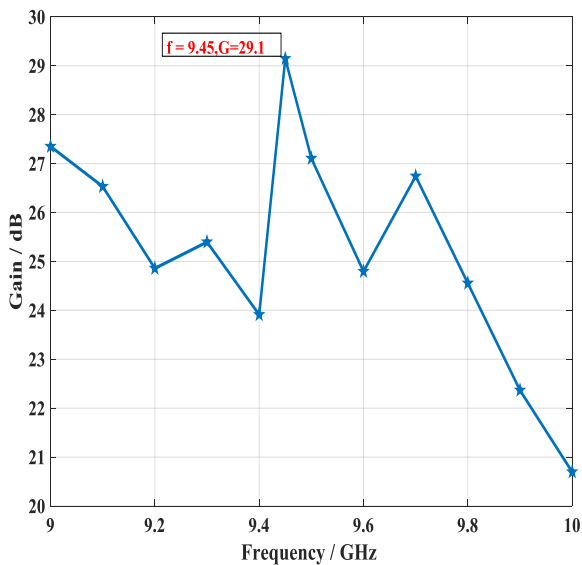
شکل (۱۷). نرخ موج ایستای ولتاژ (VSWR)

شکل (۱۸) نتایج ارزیابی مقدار ضریب بازتاب را برای ساختار پیاده‌سازی شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که با نتایج شبیه‌سازی همخوانی دارد.

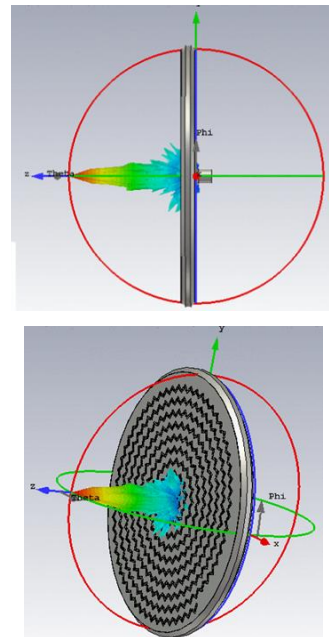


شکل (۱۸). نمودار ضریب بازتاب برای ساختار ساخته شده و مقایسه با ساختار شبیه‌سازی شده

شکل (۱۹) آنتن آرایه‌ای خطی شعاعی ساخته شده را نشان می‌دهد. این آنتن با قطر  $270$  میلی‌متر در فرکانس  $9/45$  گیگاهرتز طراحی و ساخته شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است، در فرکانس مورد طراحی این آنتن دارای بهره  $29/1$  دسی‌بل است. شکل (۲۲) نمایی سه‌بعدی از پرتو شبیه‌سازی‌شده آنتن را نشان می‌دهد.



شکل (۲۳). نمودار بیشینه بهره در برودساید



شکل (۲۲). نمای سه‌بعدی از پرتو شبیه‌سازی شده آنتن در فرکانس ۹/۴۵ گیگاهرتز

جدول (۲). مشخصات کارهای انجام‌شده در حوزه آنتن‌های آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی

سال	توان قابل تحمل (mW)	بازدهی دهانه (درصد)	نسبت محوری (dBi)	بهره (dBi)	قطر آنتن (متر)	فرکانس (گیگاهرتز)	نوع آنتن	طراح
۲۰۱۳	اشاره نشده است	اشاره نشده است	اشاره نشده است	۲۷/۶	۰/۰۱۴	۲۷۰	دولایه	ژانگ‌فنگ و همکاران
۲۰۱۳	اشاره نشده است	اشاره نشده است	اشاره نشده است	۴۴/۶	۰/۹	۳۲	ساختار لانه‌زنبوری	نگیون و همکاران
۲۰۱۷	اشاره نشده است	اشاره نشده است	کمتر از ۳	۲۰/۴	۰/۳۵۴	۲۰	تک‌لایه	زاهدول اسلام و همکاران
۲۰۱۷	هدف طراحی پرتوهای بسل مرتبه بالاتر				۰/۵	۱۲/۵	تک‌لایه	دیوید کامیت و همکاران
۲۰۱۹	هدف طراحی پرتوهای جمع (سیگما) و تفاضل (دلتا)			۲۸	اشاره نشده است	۲۴	تک‌لایه	واز کوز روی و همکاران
۲۰۲۰	هدف بهبود مدلی ریاضی برای محاسبه جهت‌دهی						تک‌لایه	متیو و همکاران
۲۰۲۱	۱۲۳	۲۸/۵	۱/۳۳	۲۹/۱	۰/۵۴	۹/۴۵	دولایه	کار مقاله حاضر

توان به آنتن تزریق شود، مقدار بیشینه شدت میدان الکتریکی روی سطحی که در فاصله ۸ میلی‌متری از صفحه شکافها قرار دارد، بعد از بهینه‌سازی واحد تشعشع برابر ۴۵۰۰ ولت بر متر خواهد شد. شکل (۲۴) نمایی از نحوه توزیع میدان الکتریکی روی صفحه شکافها را نشان می‌دهد.

حد آستانه شکست برای هوا (مقاومت دی‌الکتریک) ۳ کیلوولت بر میلی‌متر است. با در نظر گرفتن دی‌الکتریک روی سطح آنتن و ایجاد خلأ می‌توان این سطح آستانه را به مقدار ۵۰ مگاولت بر متر افزایش داد [۳۲]. طبق رابطه‌ی (۱۲) توان با مجذور میدان رابطه‌ی مستقیم دارد.

شکل (۲۳) نمودار بیشینه بهره در برودساید را نشان می‌دهد. جدول (۳) نیز نسبت محوری را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۳). مقدار نسبت محوری (Axial Ratio) در فرکانس‌های مختلف

فرکانس	۹	۹/۱	۹/۲	۹/۳	۹/۴	۹/۵	۹/۶	۹/۷	۹/۸
نسبت محوری (دسی‌بل)	۱/۱۲	۱/۸	۱	۰/۲	۱/۳۳	۱/۵۳	۱/۹۷	۱/۷۹	۱/۵۹

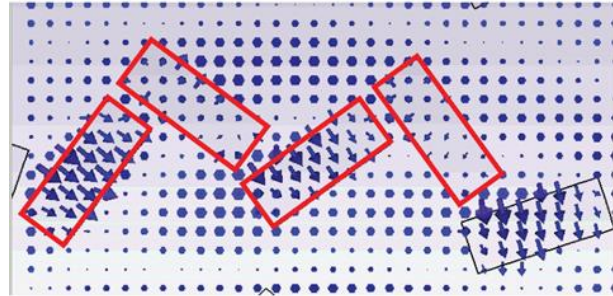
نرم‌افزار CST برای انجام شبیه‌سازی‌ها به پورت ورودی آنتن یک وات توان تزریق می‌کند. برای آنتن مقاله مورد نظر، اگر یک وات

آرایه‌ای خطی شعاعی برای استفاده در توان‌های بالا طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شد. آزمون‌های عملی آنتن به‌خوبی نتایج طراحی و شبیه‌سازی ساختار را تأیید می‌کنند. کوچک بودن ساختار، بهره‌ی بالا و قابلیت تحمل توان بالا از ویژگی‌های بسیار ممتاز این ساختار هستند. در مقابل مزایای عنوان شده، پیچیدگی طراحی و طولانی‌بودن زمان شبیه‌سازی‌ها نیز از معایب این آنتن هستند.

## ۷- مراجع

- [1] V.-P. Kutinlahti, "Antenna for Directive Energy Device Against Drones," M.S., Alto, Espoo, Finland, July 29, 2019.
- [2] P. D. Mallahzadeh Alireza, Sadeghein Amirhossein, "Analysis and Desing of Radial slot array antenna for circular polarization," A thesis of Master of Science, Shahed University, January 2017.
- [3] J. S. Benford, Edl; Swegle, John Allan High power microwaves Third Edition ed. CRC Press ; p. 466, [2016] ©2016.
- [4] JH. Arai, "Radial Line Slot Antennas," in Handbook of Antenna Technologies, Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, and T. Zwick Eds. Singapore: Springer Singapore, pp. 1773-1785, 2016.
- [5] F. ZHUO, "DESIGN OF RADIAL LINE SLOT ANTENNAS," Master of Engineering, National University of Singapore, 2005.
- [6] Q. L. Steven (Shichang) Gao, Fuguo Zhu Circularly Polarized Antennas Wiley-IEEE Press, p. 322, 2014.
- [7] A. Akiyama et al., "High gain radial line slot antennas for millimetre wave applications," vol. 147, no. 2, pp. 134-138, 2000.
- [8] N. Tung, H. Ueda, J. Hirokawa, and M. Ando, "A Radial Line Slot Antenna for an Elliptical Beam," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 12, pp. 5531-5537, 2012.
- [9] M. Ando, S. Ito, H. Kawasaki, and N. Goto, "Design of a radial line slot antenna with improved input VSWR," Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications), vol. 71, no. 9, pp. 76-91, 1988/09 1988.
- [10] G. A. T. Warren L. Stutzman, Antenna Theory and Design Wiley, p.848, 2012.
- [11] C.-W. Yuan, S.-R. Peng, T. Shu, Z.-Q. Li, H. J. I. T. o. A. Wang, and Propagation, "Designs and experiments of a novel radial line slot antenna for high-power microwave application," vol. 61, no. 10, pp. 4940-4946, 2013.
- [12] M. Ando, K. Sakurai, N. Goto, K. Arimura, Y. J. I. t. o. a. Ito, and propagation, "A radial line slot antenna for 12 GHz satellite TV reception," vol. 33, no. 12, pp. 1347-1353, 1985.
- [13] K. Kelly, F. J. I. T. o. A. Goebels, and Propagation, "Annular slot monopulse antenna arrays," vol. 12, no. 4, pp. 391-403, 1964.
- [14] M. Ando, K. Sakurai, N. J. I. T. o. A. Goto, and Propagation, "Characteristics of a radial line slot

$$P = \frac{|E|^2}{\eta} \Rightarrow P \propto |E|^2 \quad (12)$$



شکل (۲۴). نمایی از نحوه توزیع میدان الکتریکی روی صفحه شکاف-ها در فرکانس ۹/۴۵ گیگاهرتز

برای آنتن این مقاله، توان یک وات باعث ایجاد بیشینه میدانی معادل ۴۵۰۰ ولت بر متر می‌شود. بنابراین اگر مقاومت دی-الکتریک برابر ۵۰ مگاومت بر متر باشد، توان قابل تحمل آنتن به صورت رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{|E_1|^2}{|E_2|^2} \Rightarrow \frac{1(W)}{P_2} = \frac{(4500(V/m))^2}{(50(MV/m))^2} \quad (13)$$

$$\Rightarrow P_2 \cong 1.234 \times 10^8 (W) \cong 123.4 MW$$

که در آن  $P_1$  توان تزریق شده به ورودی آنتن جهت انجام شبیه‌سازی است و مقدار آن در اینجا یک وات در نظر گرفته شده است.  $P_2$  توان قابل تحمل آنتن است. در جدول (۲) مقایسه‌ای کامل از کارهای انجام شده با نمونه این مقاله ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ساختار پیاده‌سازی شده به‌خوبی اهداف مقاله را برآورده کرده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار خطی شعاعی (RLSA) از نوع آنتن‌های آرایه‌ای صفحه‌ای با بازدهی بالا است که برای تولید پلاریزاسیون دایروی به کار می‌رود. فرایند طراحی و ساخت شامل طراحی شکاف‌ها، ساختار تغذیه، ساختار موج آهسته، ملاحظات توان بالا و پیاده‌سازی است. تحلیل آنتن به معادله توزیع شکاف‌ها انجامید. ضریب بازتاب و پهنای باند آن تأثیر بسیار زیادی روی عملکرد آنتن دارد. بنابراین در این مقاله ساختاری بهینه برای تغذیه آنتن طراحی شد. در این آنتن‌ها برای ازبین‌بردن گلبرگ‌های (لوب‌های) مزاحم ناشی از آرایه‌ای بودن ساختار، از یک ساختار موج آهسته شعاعی استفاده می‌شود. که در ادامه کار ساختار موج آهسته با تکیه بر تئوری فلوکه طراحی شد. در نهایت، یک آنتن

- [25] R. S. Elliott, *Antenna Theory & Design*. Wiley-IEEE Press (1747), 2003-01-14.
- [26] M. R. U. Islam, "Radial Line Slot Array (Rlsa) Antenna Design For Point To Point Communication At 5.8 Ghz," Master Of Engineering (Electrical-Electronics & Telecommunication) Master Of Engineering (Electrical-Electronics & Telecommunication), Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Universiti Teknologi Malaysia, May 2007.
- [27] X. Meng, "A synthesis technique for radial line slot array antennas with isoflux radiation patterns," University of Ottawa (Canada), 2009.
- [28] H. Sasazawa, Y. Oshima, K. Sakurai, M. Ando, N. J. I. t. o. a. Goto, and propagation, "Slot coupling in a radial line slot antenna for 12-GHz band satellite TV reception," vol. 36, no. 9, pp. 1221-1226, 1988.
- [29] K. Zhang, D. Li, K. Chang, K. Zhang, and D. Li, *Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics*. Springer, 1998.
- [30] A. F. Harvey, "Periodic and Guiding Structures at Microwave Frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 1, pp. 30-61, 1960/01 1960.
- [31] J. Hirokawa, M. Ando, and N. Goto, "Analysis of slot coupling in a radial line slot antenna for DBS reception," in *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 137, no. 5: IET, pp. 249-254, 1990.
- [32] S. Peng, C. Yuan, and T. Shu, "Analysis of a high power microwave radial line slot antenna," *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, no. 7, p. 074701, 2013/07 2013.
- [33] M. Ettorre et al., "On the near-field shaping and focusing capability of a radial line slot array," vol. 62, no. 4, pp. 1991-1999, 2014.
- antenna for 12 GHz band satellite TV reception," vol. 34, no. 10, pp. 1269-1272, 1986.
- [15] M. Takahashi, J. Takada, M. Ando, and N. Goto, "Characteristics of small-aperture, single-layered, radial-line slot antennas," in *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 139, no. 1: IET, pp. 79-83. 1992.
- [16] M. Takahashi et al., "Dual circularly polarized radial line slot antennas," vol. 43, no. 8, pp. 874-876, 1995.
- [17] P. W. Davis, M. E. J. I. A. Bialkowski, and P. Magazine, "Linearly polarized radial-line slot-array antennas with improved return-loss performance," vol. 41, no. 1, pp. 52-61, 1999.
- [18] Y. Kim, J. Lee, H. Chae, J. Park, S.-C. Kim, and S. J. E. L. Nam, "60 GHz band radial line slot array antenna fed by rectangular waveguide," vol. 38, no. 2, pp. 59-60, 2002.
- [19] J. F. González, P. Padilla, G. Expósito-Domínguez, M. J. I. A. Sierra-Castañer, and W. P. Letters, "Lightweight portable planar slot array antenna for satellite communications in X-band," vol. 10, pp. 1409-1412, 2011.
- [20] J. Xu, Z. N. Chen, X. J. I. T. o. A. Qing, and Propagation, "270-GHz LTCC-integrated strip-loaded linearly polarized radial line slot array antenna," vol. 61, no. 4, pp. 1794-1801, 2012.
- [21] T. Nguyen et al., "An equivalent double layer model for a fast design and analysis of high gain-multilayer radial line slot antennas," vol. 96, no. 11, pp.2891-2900, 2013.
- [22] A. H. W. Beck, "Space charge waves, and slow electromagnetic waves," 1958.
- [23] D. J. I. Watkins, New York, "TOPICS IN ELECTROMAGNETIC THEORY) John Wiley & Sons," p. 2, 1958.
- [24] Y. J. I. T. o. A. Rahmat-Samii and Propagation, "Useful coordinate transformations for antenna applications," vol. 27, no. 4, pp. 571-574, 1979.