

Presentation of an Algorithm for Design, Simulation and Construction of a Triple Frequency Leaky-wave Antenna Based on the Holographic Technique

S. Saeidi¹ , F. Hojat Kashani^{*2}, N. Komjani³

*** Professor of Electrical Engineering Department of IUST

(Received: 17/11/2020; Accepted: 15/06/2021)

Abstract

The main purpose of this paper is to modify the holographic technique relationship (formula) and to present an algorithm for the design of multiple frequency compact leaky-wave antennas with broadside pencil beam radiation. In the design process, the following three software HFSS, MATLAB and CST, have been utilized. As a prototype, a triple frequency planar leaky-wave antenna is designed with the SLL less than -15 dB at E and H planes and broadside pencil radiation gain of 17.9, 18.5 and 19.2 dB at 15, 16 and 17 GHz, respectively. The unit cell forming the impedance surface of the hologram is selected as a regular hexagon to have the most isotropic behavior in response to the surface wave. Modification of the holographic relationship leads to the possibility of using a surface wave feed with a simple structure for proper matching as well as controlling the SLL on the E and H planes of the antenna radiation pattern at the designed frequencies. Eventually, by constructing and testing the proposed antenna, the accuracy of the proposed design process has been verified. In measuring the radiation pattern of the E and H planes of the different frequencies in the antenna room for each frequency, the launcher corresponding to that frequency receives the excitation and the other two launchers are perfectly matched. Finally, a good agreement is observed between the simulation and measurement results.

Keywords: Holographic Antenna, Leaky-wave Antennas, Compact Multiple frequency Antenna and, Side Lobe Level (SLL)

*** Corresponding author E-mail: kashani@iust.ac.ir

علمی-پژوهشی

ارائه الگوریتم طراحی و شبیه‌سازی و ساخت آنتن موج نشستی سه فرکانسه

مبتنی بر روش هولوگرافیک

سمیه سعیدی^۱، فرخ حجت کاشانی^{۲*}، نادر کمجانی برچلوئی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استاد، ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

هدف اصلی این مقاله، اصلاح رابطه روش هولوگرافیک و ارائه الگوریتم طراحی آنتن موج نشستی چند فرکانسه فشرده با بیم‌های تشعشعی مدادی در جهت پهلوآتش می‌باشد. در روند طراحی از سه نرم‌افزار HFSS، MATLAB و CST استفاده شده است. برای نمونه، یک آنتن موج نشستی صفحه‌ای سه فرکانسه با بیم‌های تشعشعی مدادی پهلوآتش با بهره ۱۷/۹، ۱۸/۵ و ۱۹/۲ دسیبل و سطح گلبرگ جانبی صفحات E و H کمتر از -۱۵dB به ترتیب در فرکانس‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ گیگاهرتز طراحی شده است. سلول واحد تشکیل‌دهنده سطح امپدانس هولوگرام به شکل شش ضلعی منتظم انتخاب شده است تا همسانگردترین رفتار ممکن را در برابر موج سطحی داشته باشد. اصلاح رابطه هولوگرافیک منجر به امکان بهره‌گیری از یک تغذیه موج سطحی با ساختار ساده برای داشتن تطبیق مناسب و همچنین قابلیت کنترل سطح گلبرگ جانبی در صفحات E و H آنتن در فرکانس‌های طراحی شده است. در نهایت با ساخت و تست آنتن پیشنهادی صحت و سقم روند طراحی پیشنهادی راستی‌آزمایی شده است. در اندازه‌گیری الگوی تشعشعی صفحات E و H فرکانس‌های مختلف در اتاق آنتن برای هر فرکانس، تغذیه متناظر با آن فرکانس تحریک و دو تغذیه دیگر تطبیق کامل در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت، همخوانی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: آنتن هولوگرافی، آنتن‌های موج نشستی، آنتن چند فرکانسه فشرده، سطح گلبرگ جانبی

۱. مقدمه

هدایتی و عایقی به فرم حقیقی می‌باشد و از آنجایی که سرعت فاز مود اصلی کمتر از سرعت نور است، این امواج در مود اصلی به‌طور ذاتی غیرانتشاری هستند. برای ایجاد تشعشع در آنتن‌های موج نشستی موج آهسته از متناوب‌سازی ساختار استفاده می‌شود. این تناوب موجب می‌شود که علاوه بر مود اصلی غیرتشعشی، هارمونیک‌های فلوکه نیز تشکیل شوند که برخی از این هارمونیک‌ها در ناحیه مخروط تشعشعی نمودار پاشندگی قرار گرفته و به تبع آن شرط تشعشع را ارضا می‌کنند. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین آنتن‌های موج نشستی یکنواخت و متناوب انجام شده است [۲].

امروزه طراحی و پیاده‌سازی عملی آنتن‌ها با ساختارهایی که خاصیت مجتمع‌سازی را داشته باشند و تا حد امکان از ابعاد و قیمت پایین‌تری برخوردار باشند اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. آنتن‌های موج نشستی به‌عنوان دسته‌ای از آنتن‌ها که ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارند همیشه مورد توجه بوده‌اند [۱].

در حالت کلی آنتن‌های موج نشستی را می‌توان به دو دسته یکنواخت (موج سریع) و متناوب (موج آهسته) طبقه‌بندی نمود. تفاوت این دو دسته در میزان سرعت فاز موج نسبت به سرعت نور می‌باشد. در آنتن‌های موج سریع، سرعت فاز بیشتر از سرعت نور می‌باشد و در آنتن‌های موج آهسته عکس این امر صادق می‌باشد. ساز و کار تشعشع در آنتن‌های موج سریع مشابه آنتن‌های موج رونده است و در آن‌ها، تشعشع به‌طور پیوسته در طول آنتن رخ می‌دهد. در آنتن‌های موج آهسته مود اصلی موج هدایتی از نوع موج آهسته و ثابت انتشار آن با صرف نظر از تلفات

جدول (۱): مقایسه بین آنتن‌های موج نشستی یکنواخت و متناوب

آنتن موج نشستی		مشخصه تشعشعی
متناوب	یکنواخت	
Endfire تا Backfire	Endfire تا Broadside	گستره اسکن
موج آهسته	موج سریع	مود انتشاری
هارمونیک‌های فضایی	مود غالب	مود نشستی
دارد	ندارد	باند توقف

کار بردن آنها در ساختارهای فشرده بسیار سخت می‌باشد [۳]. اما آنتن‌های هولوگرافی که از نوع آنتن‌های موج نشستی متناوب می‌باشند از ساختار موج‌برهای دی‌الکتریک بهره می‌برد این نقص را ندارد. یکی از خواص ذاتی آنتن‌های موج نشستی اسکن زاویه‌ای فضا، با تغییر فرکانس می‌باشد و یکی از چالش‌های اساسی طراحان، حفظ جهت الگوی تشعشعی با تغییر فرکانس در آنتن‌های موج نشستی می‌باشد. هدف اصلی این مقاله، اصلاح رابطه روش هولوگرافیک و به دنبال آن، ارائه الگوریتم طراحی آنتن موج نشستی چند فرکانسه فشرده با بیم‌های تشعشعی مدادی در جهات تشعشعی دلخواه و حتی یکسان می‌باشد. لاینچر یا تغذیه سطوح هولوگرام به صورت مونوپل قارچی شکل انتخاب شده است تا امکان پیاده‌سازی ساده‌تر و همچنین کمترین تاثیر مخرب را بر روی الگوی تشعشعی داشته باشد.

۲. روش هولوگرافیک

نخستین کاربرد روش هولوگرافیک در اپتیک بوده است. انتقال دانش هولوگرافیک از اپتیک به مایکروویو چشم‌انداز نوینی را برای رفع مشکلات رایج آنتن‌های موجود در این محدوده فرکانسی از جمله افزایش بازده تشعشعی، بهره، سمت‌گرایی، کاهش سطح گلبرگ‌های کناری، کاهش ابعاد آنتن و ... ایجاد کرده است [۴]. در آنتن‌های هولوگرافیک، صفحه هولوگرام همان سطح روزنه تشعشعی است که در حالت موج نشستی، توسط امواج سطحی تحریک می‌شود. طبق تعریف، هولوگرام یک الگوی واسط از انطباق امواج مرجع (موج سطحی در حالت موج نشستی) و موج هدف (تشعشعی) می‌باشد و با تنظیم ساختار و ویژگی‌های هندسی آنتن هولوگرافیک می‌توان امواج ناشی از آنتن مرجع را به منظور دستیابی به الگوی تشعشعی مطلوب (موج هدف) مهندسی کرد.

نخستین ایده آنتن‌های هولوگرافیک در سال ۱۹۶۸ توسط چکاسکی ارائه شد ولی با توجه به بازده روزنه پایین آنتن پیشنهادی و تغذیه پیچیده آن با یک آنتن شیبوری، ایده مذکور توجه محققان را در آن زمان جلب نکرد [۵]. امروزه روش هولوگرافیک در طراحی آنتن‌ها و ادوات مایکروویو مبتنی بر موج سطحی کاربرد فراوانی دارد. در آنتن‌های هولوگرافیک با بهره‌گیری از روش هولوگرافیک، سطح واسطی بین امواج هدف و مرجع ایجاد می‌شود که این سطح، دربردارنده اطلاعات دامنه و فاز هر دو موج است به گونه‌ای که با تابش موج مرجع به سطح، موج هدف (مطلوب) ایجاد گردد. به دلیل قابلیت مجتمع سازی آنتن‌های هولوگرافیک، انعطاف‌پذیر بودن سطح هولوگرام آن‌ها، تنوع در نوع تحریک و ویژگی‌های تشعشعی موج خروجی، کاربرد این نوع آنتن‌ها رو به افزایش می‌باشد [۶]. تنوع در انتخاب نوع موج مرجع برای آنتن‌های هولوگرافیک، زمینه‌های تحقیق فراوانی را ایجاد می‌کند. برای مثال اگر موج مرجع به شکل امواج سطحی

تجزیه و تحلیل آنتن‌های موج نشستی را می‌توان مطابق جدول (۲) به دو دسته عددی و تحلیلی طبقه‌بندی نمود. در روش‌های تجزیه و تحلیل عددی، بدون هیچ دید فیزیکی نسبت به عملکرد و سازوکار آنتن، کل ساختار حل می‌شود. بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند. به‌طور مرسوم ابتدا از روش‌های تحلیلی برای تجزیه و تحلیل آنتن استفاده و سپس برای سرعت بخشیدن به روند طراحی و بررسی دقت و تطبیق نتایج از نرم‌افزارهای تجاری استفاده می‌شود.

جدول (۲): روش‌های تجزیه و تحلیل آنتن‌های موج نشستی

نوع تجزیه و تحلیل	روش‌های تجزیه و تحلیل
تجزیه و تحلیل عددی	تفاضل محدود (FD)
	ممان (MOM)
	اجزای محدود (FEM)
تجزیه و تحلیل تحلیلی	مفهوم موج نشستی و محاسبه ضرایب α, β
	شبکه مدار معادل عرضی (TEN)
	آرایه‌ای از عناصر

یکی از اصلی‌ترین روش‌های تجزیه و تحلیل آنتن موج نشستی استفاده از مفاهیم ثابت انتشار β و تضعیف α و محاسبه آن‌ها می‌باشد. با محاسبه این ضرایب می‌توان زاویه تشعشعی، پهنای بیم و میزان اسکن فرکانسی را محاسبه کرد. برای محاسبه این ثابت‌ها از میدان نزدیک آنتن استفاده می‌شود. برای افزایش سرعت تحلیل روش شبکه مدار معادل عرضی بسیار مناسب است. در این روش میدان‌های راه دور بر اساس مدار معادل محاسبه و تقریب زده می‌شوند. چالش این روش به دست آوردن مدار معادل برای آنتن موج نشستی است. در روش شبکه معادل عرضی فرمول‌های به دست آمده برای همه زوایا و فرکانس‌ها دقیق نیست، بنابراین دارای دقت خوبی نمی‌باشد. ولی این روش دارای سرعت محاسباتی بالایی است. همچنین در تحلیل آنتن موج نشستی می‌توان فرض کرد که ساختار از آرایه‌ای از عناصر با دامنه و فازهای مختلف تشکیل شده است و سپس با استفاده از مفاهیم آرایه فازی ساختار را تحلیل کرد. این روش نیز دارای دقت خوبی است. با مقایسه کلی روش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که بهترین و دقیق‌ترین روش تحلیل استفاده از مفهوم موج نشستی و محاسبه ضرایب آن با استفاده از میدان‌های نزدیک است [۲]. با این روش می‌توان سازوکار تشعشعی آنتن را نیز درک کرد. در این مقاله از ترکیب تجزیه و تحلیل تحلیلی مبتنی بر ثابت انتشار و نرخ نشستی و تجزیه و تحلیل عددی استفاده خواهد شد.

در غالب موارد، آنتن‌های موج نشستی ابعاد بزرگی داشته و به

$$n = \frac{c}{v_{ph}} = \frac{k_t c}{\omega} \quad (2)$$

که در آن k_t بردار موج سطحی است. با استفاده از نرم‌افزارهای حل تمام موج HFSS یا CST می‌توان فرکانس ویژه ω را برحسب اختلاف فاز ϕ در امتداد سلول واحد به طول a به دست آورد. از طرفی $\phi = k_t a$ می‌باشد. بنابراین ضریب شکست n به دست می‌آید. بنابراین با توجه به معادلات ماکسول، امپدانس سطحی مود TM از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$Z_{surf} = j\eta_0 \frac{k_z}{k} = j\eta_0 \sqrt{\left(\frac{k_t}{k}\right)^2 - 1} = \eta_0 \sqrt{1 - n^2} \quad (3)$$

روش سوم مبتنی بر مدار معادل خط انتقالی است [۱۷]. در این مقاله از روش دوم برای محاسبه امپدانس سطحی استفاده می‌شود.

ساختار آنتن‌های موج نشستی مبتنی بر روش هولوگرافیک را از منظر نحوه تغذیه می‌توان به دونوع تغذیه از مرکز (center fed) و تغذیه از کنار (side fed) طبقه‌بندی کرد [۱۸]. یکی از مشکلات ساختارهایی که تغذیه از وسط دارند این است که در ساز و کار تشعشع آن‌ها از هر دو حالت پرتوهای رو به جلو (پیشرو) و رو به عقب (پسرو) استفاده می‌شود که منجر می‌شود که در الگوی تشعشعی میدان دور آن‌ها پدیده‌ای به نام گوش خرگوشی^۴ ایجاد شود. برای رفع این مشکل می‌توان سطح هولوگرام را به دو بخش با در نظر گرفتن یک مرز گذرنده از محل تغذیه و پیاده‌سازی امپدانس سطحی هر یک از بخش‌های هولوگرام با در نظر گرفتن اختلاف فاز 180° درجه‌ای در رابطه هولوگرام‌ها نسبت به هم تقسیم کرد [۱۹].

۳. تعمیم، اصلاح و پیاده‌سازی روش هولوگرافیک

رابطه هولوگرافیک را برای چند فرکانس مختلف می‌توان به فرم (۴) تعمیم داد.

$$Z_{surf} = \frac{j\eta_0}{N} \sum_{n=1}^N X_{\lambda n} \left[1 + M_{\lambda n} \operatorname{Re} \left(\psi_{rad-\lambda n} \psi_{surf-\lambda n}^* \right) \right] \quad (4)$$

که برای سه فرکانس بایستی X و M های مربوطه را با انتخاب سلول واحد مناسب استخراج نمود. در ابتدا به طراحی سه آنتن مجزای تک فرکانس پرداخته می‌شود.

۳-۱. انتخاب سلول واحد

برای تحریک بهتر موج سطحی، زیر لایه مورد استفاده در این مقاله، Rogers RT 4003 به ضخامت $1/524$ میلی‌متر می‌باشد.

به صفحه واسط اعمال شود، آنگاه می‌توان از روش‌های موجود در طراحی آنتن‌های موج نشستی در طراحی آنتن هولوگرافیک شامل سطوح امپدانس مدوله‌شده، بهره گرفت. رابطه هولوگرافیک به صورت (۱) است [۷].

$$Z_{surf} = jX_o \eta_o \left(1 + M \times \operatorname{Re} \left\{ \psi_{obj} \psi_{ref}^* \right\} \right) \quad (1)$$

که در آن $X_o \eta_o$ ، M ، ψ_{obj} ، ψ_{ref} به ترتیب، موج مرجع، موج هدف، عمق مدولاسیون و میانگین مدولاسیون می‌باشند [۸].

یکی از کاربردهای هولوگرافیک چرخش پرتو اصلی آنتن است. برای نمونه، جهت تحقق این امر می‌توان موج هدف را به فرم یک موج صفحه‌ای با زاویه مایل دلخواه نسبت به صفحه هولوگرام در نظر گرفت [۹]. از کاربردهای دیگر می‌توان به قابلیت تمرکز موج در یک نقطه است که در علم بیوزیست‌شناسی بسیار با اهمیت است، اشاره نمود [۱۰]. همچنین برای شکل‌دهی بیم، در صورتی که میدان نزدیک موج هدف دارای رابطه فرم بسته مانند بیم‌های گردابی^۱، بسل^۲ و... باشد می‌توان از روابط مربوط به مدولاسیون سینوسی امپدانس‌های اسکالر و تانسوری استفاده کرد و بیم مدنظر را تحقق داد [۱۱]. ایجاد موج نشستی با چند بیم تشعشعی هم‌زمان یکی دیگر از کاربردهای آنتن‌های هولوگرافیک است [۱۴-۱۲].

از نظر مود کاری، آنتن‌های موج نشستی هولوگرافیک را می‌توان به مدهای TM، TE تقسیم‌بندی نمود. در ساختار آنتن‌های هولوگرافیک مود TM از سلول واحدهای دارای صفحه زمین و در حالت مود TE از سلول واحدهای بدون صفحه زمین استفاده می‌شود. آنتن‌های مود TE به دلیل عدم وجود صفحه زمین در ساختارشان دارای یک بیم ناخواسته غیرمستقل از بیم اصلی هدف می‌باشند [۱۵]. بنابراین در این مقاله از ساختارهای مود TM استفاده می‌شود. سلول واحدهای همسانگرد (اسکالر) معمولاً برای کنترل امواج سطحی و دست‌یابی به تشعشع موج نشستی استفاده می‌شوند. در مقالات سه روش کلی برای به دست آوردن امپدانس اسکالر پیشنهاد شده است. در روش اول، از شبیه‌سازی تمام موج بر اساس حل مود ویژه^۳ و محاسبه میدان‌ها بر روی سلول واحد استفاده می‌شود. امپدانس سطحی برابر با نسبت میدان الکتریکی مماسی به میدان مغناطیسی مماسی در نزدیکی سطح است [۱۶].

در روش دوم نیازی به انترگرال‌گیری میدان‌ها نیست. برای یک موج سطحی مقید می‌توان ضریب شکست n را به صورت نسبت سرعت نور در فضای آزاد به سرعت فاز موج در امتداد سطح (رابطه (۲)) تعریف کرد [۱۶].

¹ Vortex

² Bessel

³ Eigenmode

^۴ Rabbit's ear

بعدی، بعد از استخراج توزیع امپدانس مورد نیاز برای تبدیل موج مرجع به موج هدف از این منحنی برای چیدمان سلول واحد‌ها برای تحقق توزیع امپدانس استفاده خواهد شد. مقادیر X و M که به ترتیب عمق مدولاسیون و میانگین امپدانس هستند به صورت رابطه (۵) استخراج می‌شوند.

$$X_o = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2\eta_o}, M = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2X_o\eta_o} \quad (5)$$

همچنین، ضریب شکست محیط، دوره تناوب ساختار و ثابت انتشار موج سطحی برای یک بیم مدادی در جهت بردساید ($\theta_{-1} = 0$) برای هر فرکانس از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$n = \sqrt{1 + X_o^2}, \beta_{surf} = \beta_o n, p \approx \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 + X_o^2} - \sin(\theta_{-1})} \quad (6)$$

با توجه به شکل (۲) و تعریف عمق مدولاسیون، میانگین مدولاسیون، پارامترهای طراحی فرکانس‌های مختلف را می‌توان به صورت خلاصه مطابق جدول (۳) دسته‌بندی نمود.

جدول (۳): پارامترهای طراحی فرکانس‌های مختلف

فرکانس طراحی (GHz)					مشخصه تشعشی
۱۵	۱۵/۵	۱۶	۱۶/۵	۱۷	
۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۴	X
۰/۴۵	۰/۴۵۱	۰/۴۵۵	۰/۴۵۳	۰/۴۶	M
۱/۳۲	۱/۳۳	۱/۳۴	۱/۳۵	۱/۳۷	n
۴۹۷/۶۳	۵۰۱/۴	۵۰۵/۱۷	۵۰۸/۹۴	۵۱۶/۴۸	β_{surf}
۱۵/۲	۱۴/۶	۱۴	۱۳/۵	۱۲/۹	p(mm)

۳-۲. تشکیل رابطه هولوگرافیک

حال در فرمول اصلی روش هولوگرافی امواج مرجع و امواج هدف را برای هر یک از فراسطوح تشعشی مربوط به فرکانس‌های مختلف به صورت تقریبی به صورت رابطه (۷) می‌توان در نظر گرفت.

$$\psi_{ref_{\lambda_i}} = \exp\left(-jn_i k_{\lambda_i} \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}\right)$$

$$\psi_{obj_{\lambda_i}} = \exp(-jk_{\lambda_i} [z \cos \theta + \rho \sin \theta]) \stackrel{z=h \& \theta=0}{=} \exp(-jk_{\lambda_i} h) \quad (7)$$

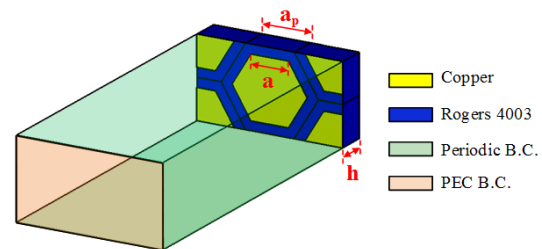
$$(x_i, y_i) = (0, 0), n_i = \sqrt{1 + X_{0_{\lambda_i}}^2}, \eta_0 = 120\pi, k_{\lambda_i} = \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

رابطه امپدانس سطحی سطح تداخلی امواج مرجع و هدف (هولوگرام) از رابطه هولوگرافیک به فرم (۸) به دست می‌آید.

$$Z_{s_i} = jX_{0_{\lambda_i}} \eta_o \left(1 + M_{\lambda_i} \cos \left[n_i k_{\lambda_i} \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - k_{\lambda_i} h \right] \right) \quad (8)$$

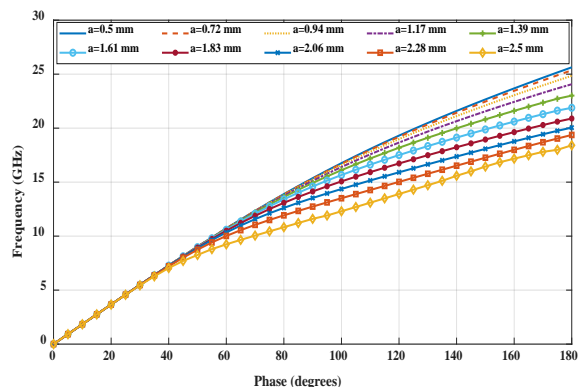
$$(x_i, y_i) = (0, 0), n_i = \sqrt{1 + X_{0_{\lambda_i}}^2}, \eta_0 = 120\pi, k_{\lambda_i} = \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

شماتیک سلول واحد شش ضلعی در محیط نرم‌افزار CST STUDIO SUITE 2020 در شکل (۱) نشان داده شده است. دلیل انتخاب سلول واحد شش ضلعی منتظم، همسانگردتر بودن آن نسبت به سایر سلول واحد‌های مربعی، نواری و ... می‌باشد. در هنگام شبیه‌سازی باید بدین نکته توجه داشت که اولاً چهار دیواره کناری را باید به صورت مرز متناوب و دیواره‌های بالا و پایین به صورت PEC تعریف شوند. نحوه تعریف این دیواره‌ها به دلیل پیش‌فرض‌های موجود در تحلیل گر مقدار ویژه این نرم افزار می‌باشد. از طرفی در قسمت پشت زمینه نرم افزار باید فاصله‌ای بین پچ فلزی با مرز تعریف شده در صفحه بالا در نظر گرفت. دلیل این مطلب آنست که اگر فاصله کم باشد محاسبات از مودهای موج‌های سطحی محدود شده بروی سطح متأثر می‌شود و اگر فاصله بسیار زیاد باشد مودهای مرتبه بالاتر در محاسبات وارد خواهند شد پارامتر طراحی در این سلول اندازه ضلع پچ شش ضلعی منتظم می‌باشد، که با پارامتر a نمایش داده شده است.



شکل (۱): شماتیک سلول واحد شش ضلعی در محیط نرم افزار CST STUDIO SUITE 2020

نهایتاً پس از شبیه‌سازی منحنی پاشندگی به ازای اندازه ضلع‌های مختلف پچ شش ضلعی منتظم و a_p برابر با ۲/۶ میلی‌متر به صورت شکل (۲) به دست می‌آید.

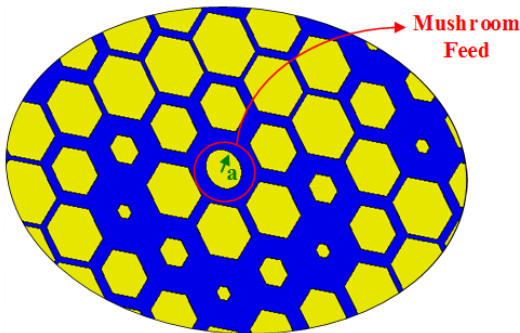


شکل (۲): شماتیک منحنی پاشندگی به ازای اندازه ضلع‌های مختلف

پچ شش ضلعی منتظم و a_p برابر با ۲/۶ میلی‌متر پس از استخراج این نمودار پاشندگی، با استفاده از ابزار برازش منحنی نرم‌افزار متلب و با استفاده از رابطه (۳) می‌توان منحنی پیوسته‌ای از امپدانس سطحی بر حسب ضلع شش ضلعی در اختیار داشت. پس از برازش داده‌های گسسته خود در گام

۳-۳. انتخاب لانچر تغذیه

لانچر تغذیه امواج سطحی در آنتن‌های موج نشستی بایستی دارای بیشینه خلوص پلاریزاسیون و کمترین اثر مخرب بر روی الگوی تشعشعی مطلوب در فرکانس طراحی دلخواه باشد. با بررسی مقالات مختلف، سه نوع و انواع لانچر تغذیه مود سطحی مود TM از مرکز ساختار آنتن انتخاب و عملکرد آنها بر روی عملکرد تشعشعی و تطبیق آنتن مورد طراحی بررسی می‌شود، و از بین سه نوع تغذیه مونوپل، تغذیه قارچی و تغذیه قارچی با نوار حلقوی، لانچر تغذیه قارچی شکل (۴) انتخاب شد.



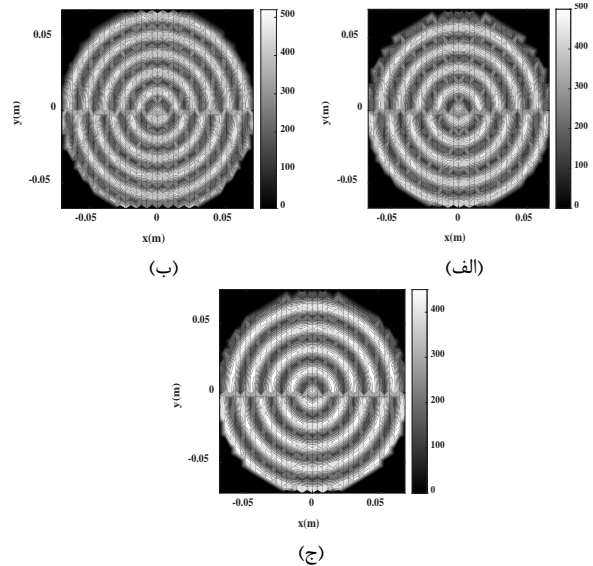
شکل (۴): لانچر تغذیه قارچی شکل به شعاع a

با توجه به اهمیت حصول تطبیق مناسب و سطح گلبرگ جانبی در اهداف این پروژه و با توجه به بررسی‌های انجام‌شده مشاهده شد که تغذیه مونوپل اگرچه طراحی و پیاده‌سازی آن آسان می‌باشد اما اثر مخرب زیادی بر روی الگوی تشعشعی دارد و با تغییر ابعاد فیزیکی فرکانس تطبیق نیز تغییر می‌کند. دو نوع تغذیه دیگر هر دو اثر مخرب کمی بر روی الگوی تشعشعی داشته اما استفاده از نوار حلقوی پیرامون تغذیه قارچی، باعث افزایش پارامترهای طراحی و در نتیجه باعث پیچیدگی در طراحی می‌شود از این‌رو استفاده از آن توصیه نمی‌شود. بنابراین حدالمقدور در طراحی‌ها از تغذیه قارچی استفاده خواهد شد، مگر اینکه امکان دستیابی به تطبیق مناسب در برخی فرکانس‌ها با تغذیه قارچی ممکن نباشد. همچنین برای سهولت تطبیق، فرمول روش هولوگرافیک را با افزودن یک فاز اولیه در آن، به‌صورت رابطه (۹) می‌توان اصلاح کرد.

$$Z_{surf} = jX_o \eta_o \left\{ 1 + M \times \text{Re} \left[\psi_{obj} \psi_{ref}^* + \phi_i \right] \right\} \quad (9)$$

بنابراین در این مقاله، پارامترهای تعیین‌کننده تطبیق مناسب، شعاع لانچر تغذیه قارچی شکل و فاز اولیه روش هولوگرافیک اصلاح‌شده می‌باشد.

با استفاده از نرم افزار متلب توزیع امپدانس مورد نیاز برای هولوگرامی که موج مرجع نقطه‌ای را به موجی مدادی شکل در جهت برودساید هدایت کند، به ازای فرکانس‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ گیگاهرتز استخراج و در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): الگوی چینش امپدانس‌های سطحی (اهم) به‌منظور بازسازی موج مدادی شکل در جهت برودساید و ازای فرکانس‌های (الف) ۱۷GHz، (ب) ۱۶GHz و (ج) ۱۵GHz

قبل از رسم ساختار آنتن و تحقق گسسته سطح امپدانسی هولوگرام به‌صورت مجموعه‌ای از سلول‌های با ابعاد مختلف توسط کدهای ویژوال متلب در نرم‌افزار CST و شبیه‌سازی تمام موج ساختار، باید به دنبال نرم‌افزاری بود که بتوان صحت رابطه هولوگرافی هر آنتن را بررسی و کمترین ابعاد ساختار را برای داشتن بهره مطلوب و SLL کم تعیین کرد. نرم‌افزار مربوطه بایستی قابلیت تعریف پارامترهای مکانی $x, y, z, \rho, \phi, \theta, r$ را به‌عنوان متغیر ذاتی دارا باشد و امکان تعریف امپدانس سطحی با تابعیت مکانی در آن وجود داشته باشد که برای این منظور نرم‌افزار HFSS انتخاب گردید و کمترین ابعاد اولیه برای شعاع آنتن‌های موج نشستی در فرکانس‌های مطلوب طراحی جهت دستیابی به SLL کمتر از -۱۵dB در صفحات E و H به‌صورت جدول (۴) به‌دست آمد.

جدول (۴): کمترین ابعاد اولیه برای شعاع آنتن‌های موج نشستی در فرکانس‌های مطلوب طراحی ۱۵، ۱۶، ۱۷GHz جهت دستیابی به SLL کمتر از -۱۵dB

فرکانس طراحی (GHz)			r(mm)
۱۵	۱۶	۱۷	
۶۸	۶۶	۶۳	

۳-۴. شبیه‌سازی گسسته سطح هولوگرام آنتن‌های موج نشستی برای فرکانس‌های مجزا با سلول واحدهای شش ضلعی

با توجه به آنچه ذکر شد، گام‌های طراحی را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت شکل (۵) بیان کرد.

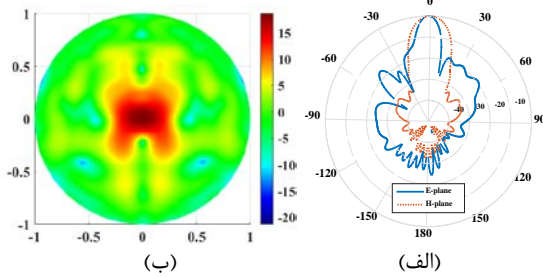
- تعیین مشخصات مطلوب آنتن (هدف طراحی، فرکانس کاری، SLL، تعداد الگوی تشعشعی، شکل الگوی تشعشعی، قطبش، نوع تغذیه، بهره آنتن و ...)
- تعیین امواج هدف و مرجع و تشکیل رابطه هولوگرافی
- انتخاب سلول واحد و زیرلایه مناسب و استخراج پارامترهای هولوگرافی (میلنگین و عمق منولایسون و ...)
- امکان سنجی هولوگرافیک در نرم افزار HFSS با شرط مرزی امپدانس سطحی و تعیین حداقل ابعاد اولیه آنتن
- طراحی لانچر و تعیین شعاع بخش فارچی شکل و فاز اولیه هولوگرافیک اصلاح شده برای حصول تطبیق مناسب
- نگاشت توزیع مقادیر امپدانس سطحی به سلول واحدهای متناظر
- رسم آنتن موج نشستی با کدهای ویژوال MATLAB و شبیه‌سازی تمام موج در نرم افزار CST

شکل (۵): گام‌های طراحی آنتن‌های موج نشستی برای فرکانس‌های مجزا

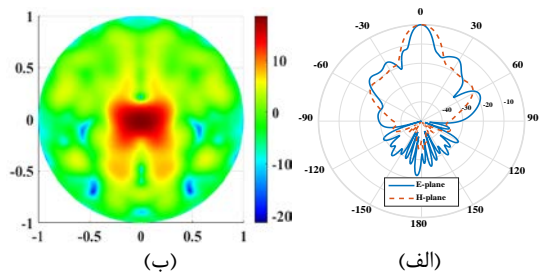
در ادامه نتایج طراحی ساختارهای آنتن‌های هولوگرافیک در فرکانس‌های طراحی ۱۵، ۱۶ و ۱۷ گیگاهرتز در جدول (۵) و به ترتیب در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) آورده شده است.

جدول (۵): ابعاد فیزیکی نهایی بهینه ساختارهای آنتن‌ها به همراه مشخصات بهینه طراحی در فرکانس‌های طراحی ۱۵، ۱۶ و ۱۷ گیگاهرتز

فرکانس طراحی (GHz)			
۱۵	۱۶	۱۷	r(mm)
۶۹	۶۴	۶۷	ϕ (degrees)
-۲	-۳	۱۰	a (mm)



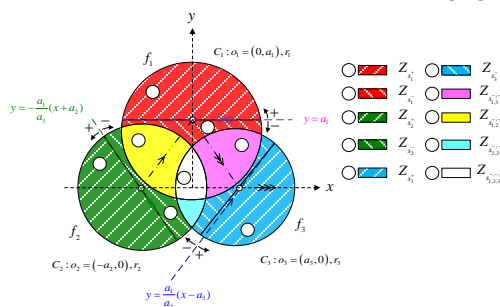
شکل (۶): الگوهای تشعشعی بهنجار (الف) صفحات E و H، (ب) دستگاه u-v و (ج) تلفات بازگشتی در فرکانس طراحی ۱۶ GHz



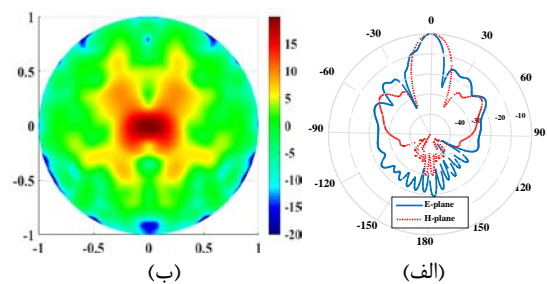
شکل (۷): الگوهای تشعشعی بهنجار (الف) صفحات E و H، (ب) دستگاه u-v و (ج) تلفات بازگشتی در فرکانس طراحی ۱۷ GHz

۳-۵. طراحی و شبیه‌سازی ساختار آنتن موج نشستی سه فرکانسه

شماتیک سطح هولوگرام آنتن موج نشستی سه فرکانسه برای فرکانس‌های طراحی ۱۵، ۱۶، ۱۷ گیگاهرتز به‌صورت شکل (۹) در نظر گرفته شده است.



شکل (۹): شماتیک سطح هولوگرام آنتن موج نشستی سه فرکانسه



شکل (۸): الگوهای تشعشعی بهنجار (الف) صفحات E و H، (ب) دستگاه u-v و (ج) تلفات بازگشتی در فرکانس طراحی ۱۵ GHz

میانگین‌گیری از کل سطح هولوگرام باعث ایجاد گلبرگ‌های جانبی نامطلوب می‌شود. برای کاهش احتمال این پدیده، عمل میانگین‌گیری امیدانس سطحی فقط در نواحی فصل مشترک‌های شکل (۹) انجام خواهد پذیرفت. از طرف دیگر، کوچک بودن ساختار حائز اهمیت است و به این منظور باید نواحی فصل مشترک تداخل بیشتری با یکدیگر داشته باشند. بنابراین باید به دنبال راهکاری برای کاهش سطح گلبرگ‌های جانبی بود. برای بهبود SLL، با توجه به شباهت ساختاری آنتن‌های با مدولاسیون دو بعدی و آنتن‌های آرایه‌ای، به نظر می‌رسد که از روش تحریک مختلف عناصر آرایه با توزیع دامنه‌های مختلف (دوجمله‌ای، چبی شف و ...) می‌توان الهام گرفت و رابطه هولوگرافیک را به فرم پیوسته (۱۱) تعمیم داد.

$$Z_{surf} = jX_o \eta_o \left\{ 1 + M \times \frac{F(r')}{\max(F(r'))} \times \text{Re} \left[\psi_{obj} \psi_{ref}^* + \varphi_i \right] \right\} \quad (11)$$

که در آن $F(r')$ یک تابعی پیوسته از مکان هر یک از سلول واحد‌های سطح هولوگرام و φ_i فاز اولیه برای دست‌یابی به بهترین تطبیق بین لانچر تغذیه و سطح امیدانسی مدوله‌شده می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن عمق مدولاسیون به فرم تابعی گوسی از مکان هولوگرام، امیدانس سطحی نهایی اصلاح شده را برای هر بخش به فرم رابطه (۱۲) می‌توان تشکیل داد.

$$F_i(r') = \exp \left(- \frac{\left\{ \sqrt{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 \right]} - \frac{r_i}{2} \right\}^2}{2\sigma_i^2} \right)$$

$$Z_{s_i} = jX_{0_{\lambda_i}} \eta_o \left(1 + M_{\lambda_i} \times \frac{F_i(r')}{\max(F_i(r'))} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_i}} \psi_{obj_{\lambda_i}}^* + \varphi_i \right\} \right)$$

$$= jX_{0_{\lambda_i}} \eta_o \left(\exp \left(- \frac{\left\{ \sqrt{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 \right]} - \frac{r_i}{2} \right\}^2}{2\sigma_i^2} \right) \times \cos \left[\frac{n_i k_{\lambda_i} \sqrt{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 \right]} - k_{\lambda_i} h + \varphi_i}{1 + M_{\lambda_i}} \right] \right) \quad (12)$$

بنابراین با توجه به روند طراحی ساختارهای تک فرکانس و رابطه هولوگرافیک اصلاحی پیشنهادی، الگوریتم طراحی یک ساختار آنتن موج نشستی سه فرکانسه را می‌توان به صورت شکل (۱۰) در نظر گرفت. ابتدا یک تابع خطا را می‌توان به فرم رابطه (۱۳) برای فرکانس‌های طراحی که شامل شروط تطبیق مناسب و SLL صفحات E و H می‌باشد، در نظر گرفت.

در شکل (۹) روابط مرسوم هولوگرافیک (۱۰) حاکم است.

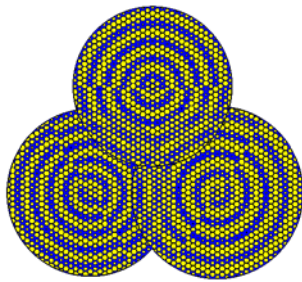
$$\begin{aligned} [1] \therefore y &\geq a_1 \cap x^2 + (y - a_1)^2 < r_1^2 \\ \Rightarrow Z_{s_1^+} &= jX_{0_{\lambda_1}} \eta_o \left(1 + M_{\lambda_1} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_1}} \psi_{obj_{\lambda_1}}^* \right\} \right) \\ [2] \therefore \begin{cases} y < a_1 \cap x^2 + (y - a_1)^2 < r_1^2 \\ \cap \left((x + a_2)^2 + y^2 > r_2^2 \cap (x - a_3)^2 + y^2 > r_3^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_1^-} &= jX_{0_{\lambda_1}} \eta_o \left(1 - M_{\lambda_1} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_1}} \psi_{obj_{\lambda_1}}^* \right\} \right) \\ [3] \therefore y &\leq -\frac{a_1}{a_3} (x + x_2) \cap (x + a_2)^2 + y^2 < r_2^2 \\ \Rightarrow Z_{s_2^+} &= jX_{0_{\lambda_2}} \eta_o \left(1 + M_{\lambda_2} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_2}} \psi_{obj_{\lambda_2}}^* \right\} \right) \\ [4] \therefore \begin{cases} y > -\frac{a_1}{a_3} (x + a_2) \cap (x + a_2)^2 + y^2 < r_2^2 \\ \cap \left(x^2 + (y - a_1)^2 > r_1^2 \cap (x - a_3)^2 + y^2 > r_3^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_2^-} &= jX_{0_{\lambda_2}} \eta_o \left(1 - M_{\lambda_2} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_2}} \psi_{obj_{\lambda_2}}^* \right\} \right) \\ [5] \therefore y &\leq \frac{a_1}{a_2} (x - a_3) \cap (x - a_3)^2 + y^2 < r_3^2 \\ \Rightarrow Z_{s_3^+} &= jX_{0_{\lambda_3}} \eta_o \left(1 + M_{\lambda_3} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_3}} \psi_{obj_{\lambda_3}}^* \right\} \right) \\ [6] \therefore \begin{cases} y > \frac{a_1}{a_2} (x - a_3) \cap (x - a_3)^2 + y^2 < r_3^2 \\ \cap \left(x^2 + (y - a_1)^2 > r_1^2 \cap (x + a_2)^2 + y^2 > r_2^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_3^-} &= jX_{0_{\lambda_3}} \eta_o \left(1 - M_{\lambda_3} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_3}} \psi_{obj_{\lambda_3}}^* \right\} \right) \\ [7] \therefore \begin{cases} (x - a_3)^2 + y^2 < r_3^2 \cap x^2 + (y - a_1)^2 < r_1^2 \\ \cap \left((x + a_2)^2 + y^2 > r_2^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_{1,3}^{\pm}} &= \frac{j\eta_o}{2} \left[X_{0_{\lambda_1}} \left(1 - M_{\lambda_1} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_1}} \psi_{obj_{\lambda_1}}^* \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. + X_{0_{\lambda_3}} \left(1 - M_{\lambda_3} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_3}} \psi_{obj_{\lambda_3}}^* \right\} \right) \right] \\ [8] \therefore \begin{cases} (x - a_3)^2 + y^2 > r_3^2 \cap x^2 + (y - a_1)^2 < r_1^2 \\ \cap \left((x + a_2)^2 + y^2 < r_2^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_{1,3}^{\mp}} &= \frac{j\eta_o}{2} \left[X_{0_{\lambda_1}} \left(1 - M_{\lambda_1} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_1}} \psi_{obj_{\lambda_1}}^* \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. + X_{0_{\lambda_2}} \left(1 - M_{\lambda_2} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_2}} \psi_{obj_{\lambda_2}}^* \right\} \right) \right] \\ [9] \therefore \begin{cases} (x - a_3)^2 + y^2 < r_3^2 \cap x^2 + (y - a_1)^2 > r_1^2 \\ \cap \left((x + a_2)^2 + y^2 < r_2^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_{2,3}^{\pm}} &= \frac{j\eta_o}{2} \left[X_{0_{\lambda_2}} \left(1 - M_{\lambda_2} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_2}} \psi_{obj_{\lambda_2}}^* \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. + X_{0_{\lambda_3}} \left(1 - M_{\lambda_3} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_3}} \psi_{obj_{\lambda_3}}^* \right\} \right) \right] \\ [10] \therefore \begin{cases} (x - a_3)^2 + y^2 < r_3^2 \cap x^2 + (y - a_1)^2 < r_1^2 \\ \cap \left((x + a_2)^2 + y^2 < r_2^2 \right) \end{cases} \\ \Rightarrow Z_{s_{1,2,3}^{\pm}} &= \frac{j\eta_o}{3} \left[X_{0_{\lambda_1}} \left(1 - M_{\lambda_1} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_1}} \psi_{obj_{\lambda_1}}^* \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. + X_{0_{\lambda_2}} \left(1 - M_{\lambda_2} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_2}} \psi_{obj_{\lambda_2}}^* \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. + X_{0_{\lambda_3}} \left(1 - M_{\lambda_3} \times \text{Re} \left\{ \psi_{ref_{\lambda_3}} \psi_{obj_{\lambda_3}}^* \right\} \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

خروجی الگوریتم برای فرکانس‌های طراحی ۱۶،۱۵GHz و ۱۷ در جدول (۶) نشان داده شده است.

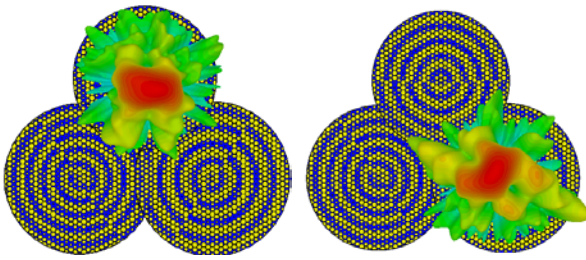
جدول (۶): خروجی الگوریتم فوق برای فرکانس‌های طراحی ۱۶،۱۵GHz و ۱۷

پارامترهای خروجی الگوریتم				فرکانس
ϕ_i (degrees)	σ_i	C_i	r_i (mm)	
-۲	۰/۰۴۹	(۵۲۰)	۶۹(۳/۴۵ λ_0)	۱۵GHz
-۳	۰/۰۶۵	(۰ و ۸۵)	۶۴(۳/۴۱ λ_0)	۱۶GHz
۱۰	۰/۰۵۲	(-۵۰ و ۰)	۶۷(۳/۸۸ λ_0)	۱۷GHz

شماتیک ساختار آنتن موج نشتی سه فرکانسه به همراه مشخصات تشعشی آن در شکل (۱۱) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که ساختار سه فرکانسه نسبت به مجموع ساختارهای موج نشتی تک فرکانسه ۱۵٪ کوچکتر است.

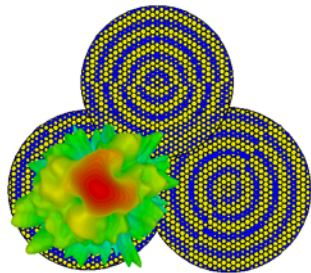


(الف)



(ج)

(ب)



(د)

شکل (۱۱): (الف) شماتیک نهایی ساختار آنتن موج نشتی سه فرکانسه و الگوی تشعشی آن در فرکانس‌های (ب) ۱۵GHz، (ج) ۱۶GHz و (د) ۱۷GHz

بسته به میزان اهمیت هر یک از مشخصات تشعشی می‌توان تابع وزن مربوطه را بیشتر در نظر گرفت. در این بخش تابع تمامی توابع وزن برابر با یک در نظر گرفته شده‌اند. سپس با الگوریتم بهینه‌سازی PSO^۱ (بهینه‌سازی گروهی ذرات)، تابع خطا کمینه کردن خواهد شد [۲۰]. پارامترهای ورودی الگوریتم، فرکانس‌های طراحی، عمق و میانگین مدولاسیون فرکانس‌های مختلف، SLLeای مطلوب و مقادیر خروجی الگوریتم، مکان مراکز هولوگرام‌ها، شعاع هولوگرام‌ها، واریانس تابع‌های گوسی عمق مدولاسیون و فازهای اولیه خواهند بود.

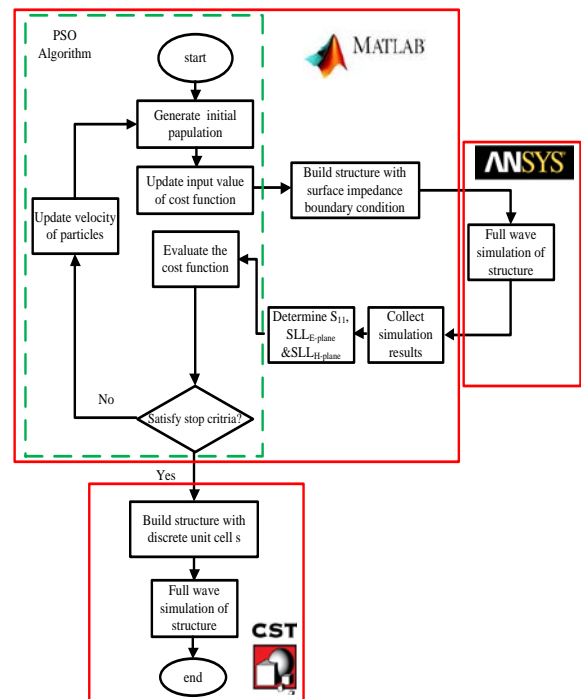
$$CF = \sum_{i=1}^3 w_1^i C_1(f_i) + w_2^i C_2(f_i) + w_3^i C_3(f_i)$$

$$f_1 = 15GHz, f_2 = 16GHz, f_3 = 17GHz$$

$$C_1(f_i) = \begin{cases} 10 - \left| S_{11}^{[dB]}(f_i) \right|^2 & ; \left| S_{11}^{[dB]}(f_i) \right| < 10 \\ 0 & ; \left| S_{11}^{[dB]}(f_i) \right| \geq 10 \end{cases}$$

$$C_2(f_i) = \begin{cases} 15 - \left| SLL_{E-plane}^{[dB]}(f_i) \right|^2 & ; \left| SLL_{E-plane}^{[dB]}(f_i) \right| < 15 \\ 0 & ; \left| SLL_{E-plane}^{[dB]}(f_i) \right| \geq 15 \end{cases}$$

$$C_3(f_i) = \begin{cases} 15 - \left| SLL_{H-plane}^{[dB]}(f_i) \right|^2 & ; \left| SLL_{H-plane}^{[dB]}(f_i) \right| < 15 \\ 0 & ; \left| SLL_{H-plane}^{[dB]}(f_i) \right| \geq 15 \end{cases} \quad (13)$$



شکل (۱۰): الگوریتم طراحی یک ساختار آنتن موج نشتی سه فرکانسه

^۱ Particle swarm optimization

جدول (۷): مشخصات تشعشی آنتن موج نشستی سه فرکانسه

فرکانس (GHz)			مشخصه تشعشی
۱۵	۱۶	۱۷	
۱۷/۹	۱۸/۵	۱۹/۲	بهره در فرکانس طراحی (dBi)
۹/۹	۱۱/۸	۹/۴	HPBW صفحه E (درجه)
۱۵/۹	۱۸/۵	۱۲/۸	HPBW صفحه H (درجه)
$\varphi=۱۴۹/۵$	$\varphi=۹۰$	$\varphi=۳۱/۵$	صفحه E (درجه)
$\varphi=۵۹/۵$	$\varphi=۰$	$\varphi=۱۲۱/۵$	صفحه H (درجه)
-۱۵/۴	-۱۵/۱	-۱۵/۳	سطح گلبرگ جانبی صفحه-E (dB)
-۱۷/۶	-۱۶/۲	-۱۵	سطح گلبرگ جانبی صفحه-H (dB)
%۸۲	%۸۷	%۹۰	بازده کل
برودساید			جهت تشعشع
مدادی			شکل الگوی تشعشی
خطی			پلاریزاسیون

۴. نتایج طراحی و ساخت

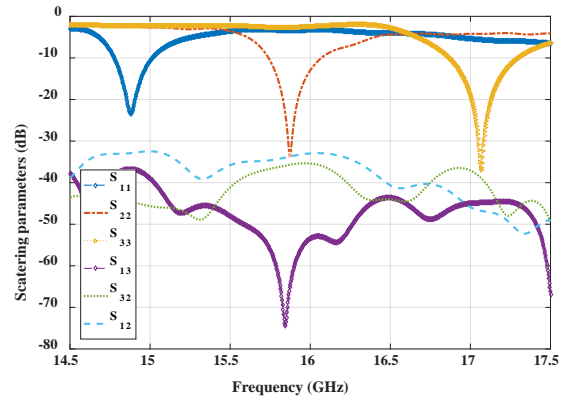
در گام آخر برای اعتبار سنجی الگوریتم پیشنهادی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آنتن موج نشستی سه فرکانسه ساخته شده است. نمایی از آنتن ساخته شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): نمونه ساخته شده آنتن هولوگرافی سه فرکانسه

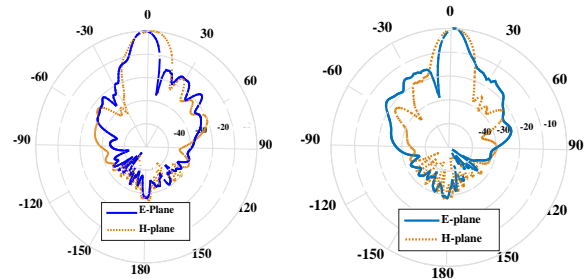
مدولاسیون سینوسی پچ‌ها در ساختار به‌وضوح مشخص است. پارامترهای پراکندگی آنتن در صنایع الکترونیک ایران (صایران) و الگوی تشعشی آن در آزمایشگاه تحقیقاتی آنتن و میکروویو دانشگاه علم و صنعت ایران تست و اندازه‌گیری شده است. که در ادامه نتایج اندازه‌گیری با شبیه‌سازی مقایسه شده است.

با توجه به شکل (۱۲) میزان ایزولاسیون بین پورت‌ها بهتر از -۳۵dB است و ساختار در فرکانس‌های طراحی دارای تطبیق مناسبی است. در شکل (۱۳) الگوی تشعشی دو بعدی ساختار آنتن موج نشستی سه فرکانسه نشان داده شده است.



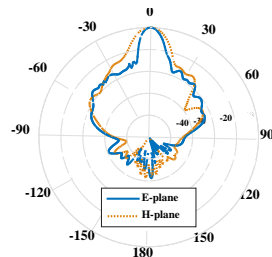
شکل (۱۲): پارامترهای پراکندگی ساختار آنتن موج نشستی سه فرکانسه

نتایج شبیه‌سازی الگوی تشعشی دو بعدی ساختار در شکل (۱۶-۱۷) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که سطح قطبش متقاطع در هر سه فرکانس در حدود -۱۵dB می‌باشد.



(ب)

(الف)



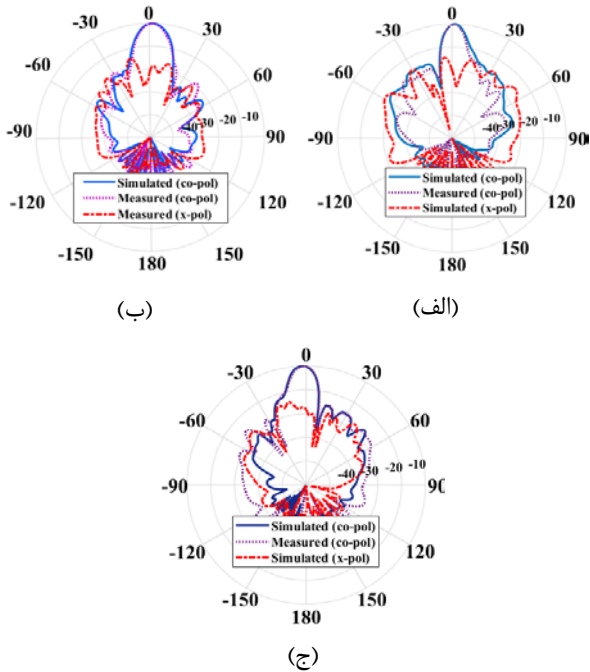
(ج)

شکل (۱۳): الگوی تشعشی دو بعدی ساختار آنتن موج نشستی سه فرکانسه (الف) ۱۵GHz، (ب) ۱۶GHz و (ج) ۱۷GHz

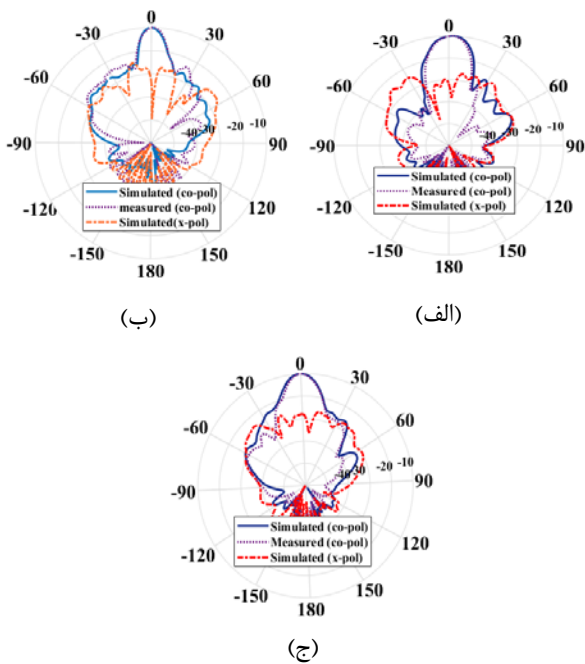
همچنین مشخصات تشعشی آنتن موج نشستی سه فرکانسه به‌طور خلاصه در جدول (۷) آورده شده است.

است.

در شکل (۱۷) مقایسه بین نتایج الگوی تشعشی دوبعدی صفحه H آنتن در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است.



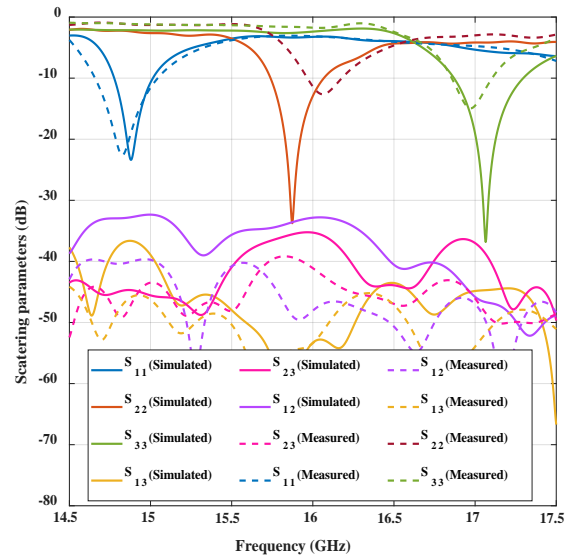
شکل (۱۶): الگوی تشعشی صفحه E و مقایسه نتایج ساخت و شبیه‌سازی در فرکانس‌های (الف) ۱۵GHz، (ب) ۱۶GHz و (ج) ۱۷GHz



شکل (۱۷): الگوی تشعشی صفحه H و مقایسه نتایج ساخت و شبیه‌سازی در فرکانس‌های (الف) ۱۵GHz، (ب) ۱۶GHz و (ج) ۱۷GHz

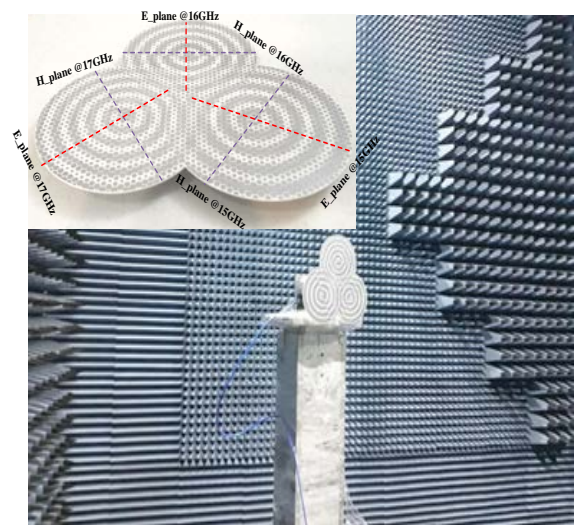
مقایسه نتایج ساخت و شبیه‌سازی پارامترهای پراکندگی

ساختار در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۴): نتایج ساخت و شبیه‌سازی پارامترهای پراکندگی ساختار آنتن موج نشی سه فرکانسه

تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشاهده می‌شود. اختلاف اندک بین نتایج می‌تواند ناشی از اثرات لحیم‌کاری کانکتورها و مقدار ثابت دی‌الکتریک زیرلایه راجرز ۴۰۰۳ باشد. صفحات E و H متناظر با فرکانس‌های مختلف به همراه تصویری از اتاق تست آنتن در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۵): چیدمان تست الگوی تشعشی آنتن ساخته‌شده

مقایسه بین نتایج ساخت و شبیه‌سازی برای الگوی تشعشی صفحه E در فرکانس‌های مختلف در شکل (۱۶) نشان داده شده

- [8] A. M. Patel, "Controlling electromagnetic surface waves with scalar and tensor impedance surfaces," University of Michigan, 2013.
- [9] C. Rusch, J. Schäfer, H. Guian, and T. Zwick, "2D-scanning holographic antenna system with Rotman-lens at 60 GHz," In *Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 196-199, Apr. 2014.
- [10] L. Novotny, "The history of near-field optics," *Prog. Opt.* 50, vol. 50, 2007.
- [11] G. Minatti, S. Maci, P. De Vita, A. Freni, and M. Sabbadini, "A circularly-polarized isoflux antenna based on anisotropic metasurface," *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 11, pp. 4998- 5009, November 2012.
- [12] D. González-Ovejero, G. Chattopadhyay, and S. Maci, "Multiple beam shared aperture modulated metasurface antennas," *Proc. IEEE AP-S Soc. Int. Symp.*, pp. 101-102, Jun/Jul. 2016.
- [13] M. Gabriele, M. Faenzi, E. Martini, F. Caminita, P. De Vita, D. González-Ovejero, M. Sabbadini, and S. Maci, "Modulated metasurface antennas for space: Synthesis, analysis and realizations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 1288-1300, 2015.
- [14] M. Karimipour and N. Komjani, "Holographic-inspired multibeam reflectarray with linear polarization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, pp. 2870-2882, no. 6, 2018.
- [15] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, New York: McGraw-Hill Book Company, pp. 1-129, 1961.
- [16] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, and D. F. Sievenpiper, "Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 10, Oct. 2010.
- [17] A. M. Patel and A. Grbic, "A printed leaky-wave antenna based on a sinusoidally modulated reactance surface", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 6, pp. 2087-2096, 2011.
- [18] L. Yun Bo, X. Wan, B. Geng Cai, Q. Cheng, and T. Jun Cui, "Frequency-controls of electromagnetic multi-beam scanning by metasurfaces," *Scientific reports* 4, p. 6921, 2014.
- [19] Ch. Rusch, *Handbook of Antenna Technologies*, Springer Science Business Media Singapore, 2015.
- [20] D. Oca, M. A. Montes, T. Stutzle, M. Birattari, and M. Dorigo, "Frankenstein's PSO: a composite particle swarm optimization algorithm," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 5, pp. 1120-1132, 2009.

طبق شکل (۱۶ و ۱۷) نتایج اندازه‌گیری الگوهای تشعشی صفحات E و H در فرکانس‌های سه‌گانه، تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. بنابراین الگوریتم طراحی ارائه‌شده تأیید می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با افزودن فاز اولیه به رابطه هولوگرافیک برای امکان تطبیق بهتر با ساختار ساده‌ای از لانچر تغذیه فراهم شد. همچنین، استفاده از عمق مدولاسیون غیرثابت (تابعی گوسی از مکان حرکت موج سطحی) منجر به کاهش SLL به میزان ۳dB شد. رابطه هولوگرافیک اصلاح شده، برای ساختار چندفرکانسه تعمیم داده شد و الگوریتمی با لینک کردن سه نرم‌افزار HFSS، MATLAB و CST برای کمینه کردن تابع خطای هدف ارائه شد. در نهایت یک ساختار آنتن موج نشستی سه فرکانسه ۱۶، ۱۷ و ۱۸GHz با SLL کمتر از -۱۵dB و بیم مدادی در جهت پهلوآتش با پلاریزاسیون خطی طراحی شد. ملاحظه شد که ایروالاسیون بهتر از ۳۵dB بین پورت‌ها وجود دارد و ساختار دارای بازدهی تشعشی مطلوبی است. همچنین میزان فشرده‌سازی آنتن سه فرکانسه به میزان در مقایسه با سه آنتن مجزای تک فرکانس، ۱۵٪ می‌باشد.

۶. مراجع

- [1] M. Okhovat and Y. Qaneh Qarehbagh, "Design of Corrugated Metallic Periodic Leaky Wave Antenna with Constant Depth and Variable Width at X-band Frequency," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, 2020. (In Persian)
- [2] D. R. Jackson, A. A. Oliner, and C. Balanis, "Modern antenna handbook," In *Leaky-Wave Antennas*, Wiley, 2008.
- [3] F. L. Whetten and A. C. Balanis, "Meandering long slot leaky-wave waveguide-antennas," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 39, pp. 1553-1560, no. 11, 1991.
- [4] P. F. Checcacci, V. Russo, and A. M. Scheggi, "Holographic antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, pp. 2165-2167, November 1968.
- [5] G. D. Cochran, "Holographic techniques applied to non-visible wave fields," in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 5, p. 193, 1967.
- [6] Y. Li, Q. Zhu, and R. Mo, "Studies on the holographic antenna: Theories and experiments," in *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pp. 654-657, 2011.
- [7] M. Albani, M. Bandinelli, F. Caminita, P. D. Vita, A. Freni, S. Maci, A. Mazzinghi, G. Minatti, and M. Sabbadini, "Holographic antennas: Principle of operation and design guidelines," in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-3, 2010.