

طراحی و شبیه سازی جاذب ریزموج شفاف فرا پهن باند با طراحی هوشمند الگوی فراماده

سحر سوقی^۱، حمید حیدر^۲، محمدرضا هراتی^{*۳}، وحید نیری^۴

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی برق گرایش مخابرات-میدان، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۲. دانشیار، مهندسی برق گرایش مخابرات-میدان، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳. استادیار، مهندسی برق گرایش مخابرات-میدان، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۴. دانشیار، مهندسی برق گرایش مخابرات-میدان، دانشکده فناوری نوین، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش طراحی و شبیه سازی یک جاذب شفاف فراماده با استفاده از روش طراحی هوشمند الگو ارایه می شود. جاذب پیشنهادی از یک زیرلایه پلی کربنات به ضخامت 4 mm تشکیل شده است که زیر آن یک صفحه زمین پیوسته از جنس یک ماده مقاومتی شفاف مانند ITO با مقاومت سطحی $20 \Omega/sq$ قرار گرفته و روی آن یک الگوی فراماده از همان جنس صفحه زمین قرار می گیرد. به منظور بهبود تطبیق امپدانس در پهنای باند وسیع و همچنین محافظت از الگوی فراماده، یک رولایه پلی کربنات، روی الگوی فراماده قرار داده می شود. برای طراحی الگوی فراماده از یک روش هوشمند بر پایه الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات دودویی استفاده می شود که منجر به کاهش زمان طراحی و بهبود عملکرد ساختار می شود. جاذب پیشنهادی، جذب بیش از 90% در پهنای باند گسترده 3.8-18.85 GHz را ارائه می دهد که به طور کامل، تمامی باندهای فرکانسی هدف این پژوهش (C، X و Ku) را پوشش می دهد.

واژه های کلیدی: جاذب شفاف، جاذب ریزموج، فراماده، BPSO، طراحی هوشمند الگو، استتار راداری

Design and Simulation of a UWB Transparent Microwave Absorber with Intelligent Metamaterial Pattern Design

Sahar Soghi¹, Hamid Heidar², Mohammad Reza Haraty^{*3}, Vahid Nayyeri⁴

1. Ph.D. Student in Electrical Engineering, The Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

2. Associate Prof., The Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3. Assistant Prof., The Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

4. Associate Prof., School of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

This research presents the design and simulation of an optically transparent metamaterial absorber using an intelligent pattern design method. The proposed absorber consists of a 4 mm thick polycarbonate substrate with a continuous ground plane made of a transparent conductive material such as ITO with a surface resistance of $20 \Omega/sq$ placed beneath it. A metamaterial pattern of the same material as the ground plane is placed on top of it. To improve impedance matching over a ultra-wide bandwidth and protect the metamaterial pattern, a polycarbonate layer is placed on top of the metamaterial pattern. For the design of the metamaterial pattern, an intelligent method based on the binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm [2] is used, which leads to a reduction in design time and improvement in the structure's performance. The proposed absorber provides more than 90% absorption in a wide bandwidth of 3.8-18.85 GHz, which completely covers all the target frequency bands of this research, namely C, X, and Ku.

Key words: Transparent absorber, Microwave absorber, Metamaterial, BPSO, Intelligent pattern design, Radar stealth.

پلی کربنات تشکیل شده است که یک سمت آن، الگوی فراماده از جنس یک ماده مقاومتی مانند ITO² با مقاومت سطحی $20 \Omega/\text{sq}$ قرار می‌گیرد و سمت دیگر آن، یک لایه‌ی پیوسته از ماده مقاومتی مذکور قرار داده می‌شود. این لایه پیوسته به عنوان صفحه زمین عمل کرده و یک سپر محافظتی قوی در برابر عبور امواج الکترومغناطیسی را شکل داده و ساختار تشدیدی فراماده را کامل می‌کند. یک بستر پلی کربنات به عنوان رولایه در بالای الگوی فراماده قرار می‌گیرد. این رولایه علاوه بر حفاظت از الگوی فراماده باعث بهبود تطبیق در پهنای گسترده و در نتیجه افزایش پهنای باند ساختار می‌گردد. برخلاف اغلب ساختارهای TMMA¹ پیشین که از روش سعی و خطا برای طراحی الگوی فراماده بهره برده‌اند، این پژوهش از یک روش طراحی دقیق بر اساس بهینه‌سازی پاسخ ساختار از طریق شکل‌دهی هوشمند الگو با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات دودویی (BPSO³) استفاده می‌کند. این رویکرد سیستماتیک فرآیند طراحی دقیق تر و کارآمدتری را ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است در طراحی این ساختار، علاوه بر عملکرد جذب ریزموج و شفافیت نوری، بر جنبه‌های عملیاتی و استحکام مکانیکی ساختار نیز توجه شده است. به همین منظور از پلی کربنات به عنوان مستحکم‌ترین بستره‌ی شفاف موجود در حال حاضر جهان، به عنوان زیرلایه و رولایه استفاده شده است. از این ساختار می‌توان به عنوان شیشه‌ی جذب جهت استتار راداری و همچنین به عنوان پنجره‌ی جذب امواج الکترومغناطیسی در ساختمان‌ها و اتاق‌های امنیتی استفاده نمود.

۲- طراحی اولیه

طرح اولیه تک سلول جذب پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سلول از دو زیرلایه پلی کربنات تجاری (GE9030) محصول شرکت LEXAN ایالات متحده آمریکا تشکیل شده است. به منظور طراحی دقیق ساختار، مشخصات الکترومغناطیسی بستره پلی-کربنات با استفاده از دو روش خط انتقال [۱۶] و اختلال حفره [۱۷] در آزمایشگاه آنتن دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر به صورت $\epsilon_r = 2/65 + j \cdot 0.05$ اندازه‌گیری شده است. در حال حاضر، زیرلایه‌های شفاف موجود جهان، به دو دسته زیرلایه‌های معدنی و پلیمری تقسیم می‌شوند. زیرلایه‌های معدنی همچون کوارتز، بوریلیکات تحمل حرارت و همچنین شفافیت بالایی دارند اما در مقابل شکننده و سنگین هستند. نقطه‌ی مقابل زیرلایه‌های معدنی، زیرلایه‌های پلیمری هستند که تحمل حرارت کمتری دارند اما بسیار مستحکم بوده و در مقابل ضربه مقاومند. در بین زیرلایه‌های معدنی، پلی کربنات، مستحکم‌ترین زیرلایه‌ی شفاف موجود است که به عنوان شیشه‌ی ضد گلوله نیز شناخته می‌شوند. از آنجایی که در این پژوهش جنبه‌های عملیاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، از این ماده به عنوان بستره‌ی جذب شفاف استفاده شده است. ضخامت زیرلایه و رولایه با توجه به باند

جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی، ساختارهایی هستند که طیف مشخصی از امواج الکترومغناطیسی را جذب می‌کنند. این ساختارها از زمان اختراعاتشان تا کنون دستخوش تغییر و تحولات شگرفی شده‌اند. طراحی‌های اولیه همچون فیلم‌های نازک فلزی توسط Woltersdorff [۱] و صفحات سالیسوری [۲]، بسیار ساده بودند اما پهنای باند جذب بسیار محدودی داشتند [۳]. جاذب‌های جاومن پهنای باند وسیع‌تری را ارائه می‌دهند اما بسیار ضخیم و سنگین هستند. با اختراع فرامواد، انقلابی در مهندسی الکترومغناطیس پدید آمد. فرامواد ساختارهای هندسی تکرار شونده‌ای هستند که در ابعاد زیرطول موج طراحی می‌شوند و خواصی از خود بروز می‌دهند که مواد طبیعی فاقد آن هستند. جاذب‌های فرامواد نیز امکان داشتن یک ساختار جاذب با پهنای باند گسترده اما با ضخامت کم را فراهم می‌کنند [۴،۵].

جاذب‌های ریزموج فراماده شفاف (TMMA¹) نمایانگر یک نوعی منحصربه‌فرد از جاذب‌ها هستند که به طور انتخابی طیف ریزموج امواج الکترومغناطیسی را جذب می‌کنند در حالی که طیف مرئی را عبور می‌دهند. این ویژگی آنها را برای کاربردهایی مانند افزایش بازده سلول‌های خورشیدی، ایجاد پنجره‌های هوشمند و کاربردهای استتار راداری ایده‌آل می‌سازد [۷،۶]. تقاضای روزافزون برای TMMA‌های با بازدهی بالا، به‌ویژه برای طراحی‌های باند وسیع و مقاوم مکانیکی در کاربردهای نظامی، نیاز به رویکردهای طراحی نوآورانه دارد. روش‌های طراحی سنتی برای جاذب‌های غیرشفاف اغلب به مقاومت‌های فشرده و مواد کامپوزیتی برای بهبود عملکرد متکی هستند. با این حال، این روش‌ها به دلیل غیر شفاف بودن عناصر تشکیل دهنده‌شان با TMMA‌ها سازگار نیستند. به همین دلیل، بهینه‌سازی عملکرد TMMA تنها به طراحی الگوی سلول واحد فراماده بستگی دارد. تحقیقات پیشین ارائه شده در این حوزه برای طراحی الگوی فراماده، یا از هندسه‌های ساده مانند وصله‌های مربعی، حلقه‌ها و ... [۸] استفاده کرده‌اند یا از رویکرد آزمون و خطا برای طرح‌های پیچیده تر [۹، ۱۰] بهره برده‌اند. این روش‌ها نه تنها زمان بر هستند بلکه هیچ تضمینی برای رسیدن به راه حل بهینه ندارند.

در سال‌های اخیر، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از روش‌های جدید مبتنی بر هوش مصنوعی، یادگیری ماشینی و ابزارهای بهینه‌سازی پیشرفته برای بهبود فرآیند طراحی انواع ادوات ریزموج وجود داشته است [۱۱-۱۵]. استفاده از این روش‌های نوین بر معایب روش‌های طراحی سنتی یعنی زمان‌بر بودن و عدم دریافت پاسخ بهینه را حذف می‌کنند.

در این مقاله یک ساختار TMMA با شفافیت بالا و طراحی هوشمند باند وسیع ارائه می‌شود. ساختار پیشنهادی، از یک زیرلایه‌ی

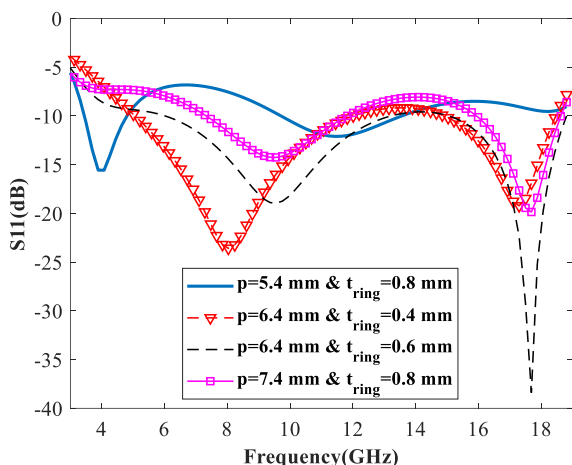
³ Binary particle swarm optimization

¹ Transparent Microwave Metamaterial Absorber

² Indium-Tin Oxide

جدول ۱- ابعاد طرح اولیه پیشنهادی

پارامتر	مقدار	توضیحات
P	۶/۴ mm	ابعاد تک سلول فراماده
t_{ring}	۰/۶ mm	عرض حلقه
R_{MM}	۲۰ Ω/sq	مقاومت سطحی الگوی فراماده
R_g	۲۰ Ω/sq	مقاومت سطحی صفحه زمین
h_1	۴ mm	ضخامت زیرلایه
h_2	۴ mm	ضخامت رولایه



شکل ۲- ضریب بازتاب (S11) طرح اولیه برای مقادیر مختلف P و t_{ring}

۳- طراحی هوشمند الگو و بهینه‌سازی BPSO

در این روش، مسئله طراحی الگوی فراماده به عنوان یک عملیات بهینه‌سازی دودویی فرموله می‌شود. سطح زیرلایه به چندین پیکسل تقسیم می‌شود و به هر پیکسل یک متغیر دودویی اختصاص داده می‌شود. مقدار "۱" نشان‌دهنده حضور و مقدار "۰" نشان‌دهنده عدم حضور ماده مقاومتی معین در یک پیکسل است. هدف، یافتن الگوی بهینه از ماده‌ی مقاومتی است که خواص الکترومغناطیسی مورد نظر را برآورده کند. در این روش از الگوریتم BPSO که کد آن در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است برای جستجوی الگوی بهینه استفاده می‌شود. این الگوریتم با یک دسته از رشته‌های دودویی صفر و یک که به طور تصادفی تولید شده‌اند شروع می‌شود. هر رشته بیانگر یک الگوی کلانید فراماده است. الگوریتم به طور مکرر، موقعیت و سرعت هر ذره را بر اساس تجربیات خود و دیگران به‌روزرسانی می‌کند. در نسخه دودویی الگوریتم PSO، موقعیت ذره m در تکرار $t+1$ ام با استفاده از فرمول زیر به روز می‌شود:

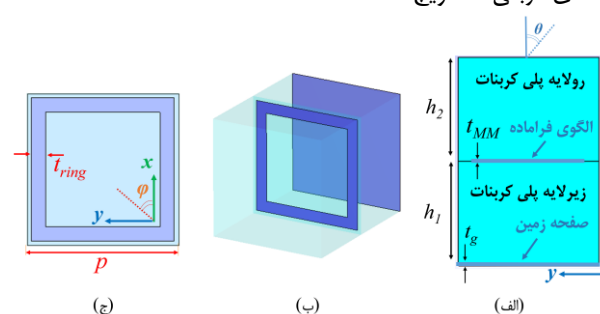
$$x_{m,n}^{t+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{m,n}^t < S(v_{m,n}^t) \\ 0 & \text{if } r_{m,n}^t > S(v_{m,n}^t) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن $r_{m,n}^t$ یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است. پارامتر $v_{m,n}^t$ تابع سیگموئید است که برای نگاشت سرعت ذرات به بازه $[0, 1]$ استفاده می‌شود. این نگاشت تضمین می‌کند که موقعیت ذرات در

فرکانسی هدف تعیین می‌شود. بدین صورت که ضخامت بهینه هر کدام از این دو لایه از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$h = \frac{\lambda_{eff}}{4} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

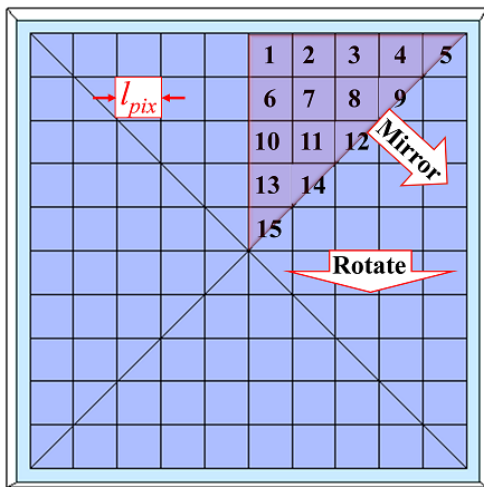
با توجه به آن که هدف این پژوهش پوشش بازه‌ی فرکانسی ۴-۱۸ گیگاهرتز است، بنابراین فرکانس مرکزی جاذب هدف، ۱۱ GHz است. بنابراین با قرار دادن طول موج ۱۱ GHz و ضریب گذردهی الکتریکی پلی‌کربنات در رابطه‌ی بالا، ضخامت بهینه زیرلایه برابر ۱۱ mm بدست می‌آید. از آنجایی که زیرلایه‌های موجود در بازار در ضخامت‌های استاندارد (۲، ۳، ۴، ... میلی‌متر) موجود هستند، ضخامت ۴ mm را به عنوان ضخامت بهینه‌ی جاذب هدف بر می‌گزینیم. قسمت زیرین زیرلایه یک لایه ماده مقاومتی با مقاومت سطحی ۲۰ Ω/sq قرار داده شده است. بین زیرلایه و رولایه یک طرح اولیه حلقه‌ی مربعی ساندویچ شده است.



شکل ۱- تک سلول طراح اولیه، الف) نمای کناری، ب) نمای بعدی، ج) الگوی اولیه پیشنهادی

فرآیند طراحی هوشمند الگو، نیازمند یک طرح اولیه به منظور تعیین پارامترهای اساسی (ابعاد تک سلول p و ابعاد تک پیکسل L_{pix}) ساختار است. حلقه‌ی مربعی ساده به عنوان بدین منظور انتخاب گشته است. به منظور کاوش سریع فضای مسئله، پارامترهای مورد نظر تحت یک جاروب ساده در نرم‌افزار CST قرار گرفتند. شرایط مرزی تک سلول (unit cell) در جهات x و y و شرایط مرزی فضای باز (open (add space)) در جهت z به سلول فراماده اعمال شد. این تنظیمات به طور خودکار پورتهای فلوک که را در Z_{min} و Z_{max} اعمال می‌کند. نظریه فلوک برای تحلیل فرامواد به کار می‌رود. با اعمال پورتهای فلوک، فرض می‌شود که تک سلول در جهات x و y تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد. پاسخ شبیه‌سازی جاروب پارامترها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که پاسخ ساختار به ازای 0.6 mm t_{ring} و $p = 6.4$ mm دارای سه فرکانس تشدید است. این مقادیر به عنوان پارامترهای اولیه به الگوریتم بهینه‌سازی داده می‌شود. هدف الگوریتم تنظیم فواصل این سه فرکانس تشدید است؛ به نحوی که به لحاظ طیفی ادغام شوند و پهن‌بندترین پاسخ ممکن را ارائه دهند و باندهای فرکانسی هدف (C, X و Ku) را به طور کامل پوشش دهد. مقادیر پارامترهای طرح پیشنهادی در جدول ۱ ذکر شده است.

Rotate به دست می‌آید. با اعمال این محدودیت، تعداد پیکسل‌ها به سطح قابل قبولی (۱۵) کاهش می‌یابد و احتمال همگرایی مسئله به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از همگرایی زودرس و به دام افتادن الگوریتم در بیشینه‌های محلی، از یک ضریب وزنی اینرسی پویا (w) در معادله به روز رسانی سرعت استفاده نمودیم. در ابتدای شروع الگوریتم مقدار این ضریب روی یک عدد بالا (۰/۹) تنظیم شده است تا به حرکت ذرات شتاب دهد و اجازه کاوش موثر فضای جستجو و فرار از بهینه‌های محلی را فراهم کند. مقدار w در هر تکرار به تدریج کاهش می‌یابد و در نهایت به مقدار ۰/۵ می‌رسد. کاهش تدریجی این ضریب وزنی اینرسی، همگرایی به سمت پاسخ بهینه‌ی سراسری را در مراحل نهایی فرآیند بهینه‌سازی تقویت می‌کند.



شکل ۴- پیکسل‌بندی تک سلول

۴- تابع هزینه

جاذب‌های فرامواد، جاذب‌های تشدیدی هستند که در یک یا چند فرکانس تشدید می‌کنند. برای دستیابی به یک جاذب فرایه‌پهن‌باند (UWB)، فاصله قله‌های جذب باید به گونه‌ای تنظیم شود که تشدیدها به صورت طیفی به صورت مطلوبی با یکدیگر همپوشانی داشته باشند. جذب امواج ریزموج از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (5)$$

که در آن A ضریب جذب، S_{11} ضریب بازتاب و S_{21} ضریب انتقال است. با استفاده از یک صفحه زمین مناسب، مقدار موج منتقل شده به شدت کاهش می‌یابد و مقدار S_{21} بسیار کم خواهد بود (کمتر از -۲۰ dB). در این حالت، S_{11} نقش غالب را در تعیین سطح جذب ایفا می‌کند ($S_{11} < -10$ dB معادل $A > 90\%$ است). بنابراین، کفایت که تنها پاسخ S_{11} در تابع هزینه لحاظ شود. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، هدف این پژوهش طراحی جاذب فرایه‌پهن‌باند در باندهای فرکانسی هدف (C, X, Ku) است، بنابراین باید پهنای باند نسبی در تابع هزینه لحاظ شود. از طرفی با توجه به اینکه برای پوشش چنین پهنای باند گسترده‌ای باید چندین تشدید داشته باشیم،

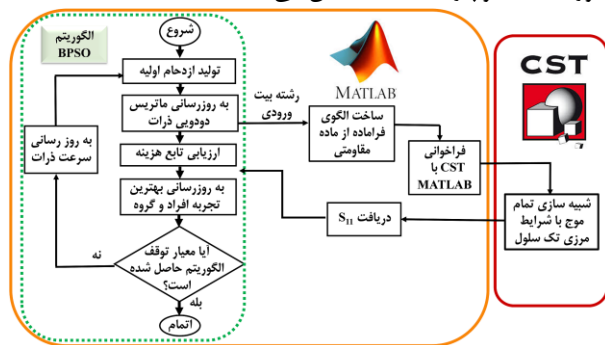
طول فرآیند بهینه‌سازی دودویی باقی بماند. تابع سیگموئید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S(v_{m,n}^t) = \frac{1}{1 + e^{-v_{m,n}^t}} \quad (3)$$

که در آن $v_{m,n}^t$ سرعت ذره m در تکرار t است که به صورت زیر به روز می‌شود:

$$v_m^t = wv_m^{t-1} + c_1e_1(P_m^{t-1} - X_m^{t-1}) + c_2e_2(G_m^{t-1} - X_m^{t-1}) \quad (4)$$

در رابطه بالا $G = [g_1, g_2, \dots, g_N]$ به ترتیب بهترین تجربه ذره m ام و بهترین تجربه گروه می‌باشند. w ضریب اینرسی، C_1 و C_2 ثابت‌های مثبتی هستند که معمولاً هر دو برابر عدد ۲ در نظر گرفته می‌شوند و e_1 و e_2 ضرایب تصادفی بین ۰ و ۱ هستند. با استفاده از روابط ذکر شده، الگوریتم مکرراً موقعیت‌ها و سرعت ذرات را به‌روز می‌کند و آنها را به سمت الگوهای با عملکرد بهتر هدایت می‌کند. این فرآیند، همگرایی به سوی یک راه حل بهینه را تسهیل می‌کند. نرم‌افزار CST برای انجام شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی تمام موج ساختار جاذب به همراه الگوهای مختلف فرامواد استفاده می‌شود. با ایجاد یک ارتباط بین MATLAB و CST، رشته‌های دودویی تولید شده توسط الگوریتم BPSO در MATLAB به عنوان دستورات برای تعریف الگوی فراماده به CST ارائه می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی به الگوریتم BPSO برای ارزیابی عملکرد هر الگوی کلنید بازگردانده می‌شود. الگوریتم زمانی پایان می‌یابد که یک معیار خاتمه از پیش تعریف شده برآورده شود. این معیار می‌تواند رسیدن به حداکثر تعداد تکرارها یا دستیابی به یک پاسخ مشخص باشد. شکل ۳ فرآیند مذکور را به صورت یک فلوجارت به دقت نشان می‌دهد.



شکل ۳- فلوجارت فرآیند بهینه‌سازی هوشمند الگو با استفاده از

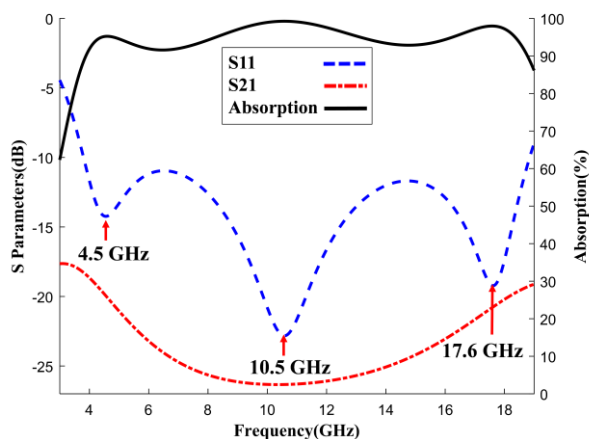
الگوریتم BPSO

از مهمترین ویژگی‌های یک جاذب ریزموج، عدم حساسیت به قطبش موج ورودی به دلیل ناشناخته بودن این پارامتر هنگام فرود موج بر سطح جاذب است؛ بنابراین استفاده از الگویی با تقارن چهارگانه برای کمینه کردن حساسیت به قطبش ضروری است. تقارن چهارگانه به تقارن نسبت به خطوط افقی، عمودی و مورب گفته می‌شود. بنابراین، طبق شکل ۴، یک هشتم سطح مورد نظر را پیکسل بندی نموده و وضعیت پیکسل‌های باقی‌مانده با استفاده از ابزار Mirror و

۵- نتایج

ازدحام جمعیت ذرات، ۲۰ در نظر گرفته شد و معیار اتمام الگوریتم، رسیدن به ۱۰۰ تکرار تنظیم گردید. الگوریتم BPSO با شرایط فوق اجرا شد و همگرایی به طرح بهینه در تکرار ۷۳ حاصل شد (به شکل ۵ مراجعه کنید). در این تکرار، رشته بیت زیر به عنوان رشته بیت بهینه بدست آمد: [۱۱۱۰۱۰۰۱۱۰۰۰۰] که شماره‌گذاری پیکسل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. هنگامی که این رشته دودویی به ساختار فیزیکی ترجمه شود، به الگوی فیلم مقاومتی که در شکل ۵ ترسیم شده است، تبدیل می‌شود. شکل ۷ نمای سه بعدی ساختار بهینه را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۷، ساختار بهینه، بیش از ۹۰ درصد امواج الکترومغناطیسی تابشی را در بازه‌ی ۳/۸ تا ۱۸/۸۵ گیگاهرتز جذب می‌کند. بنابراین، مشاهده می‌شود که باندهای هدف X، C و Ku به طور کامل پوشش داده شده است و الگوریتم با موفقیت الگویی را یافته است که به دقت فاصله‌ی بین تشدیدهای ساختار را برای دستیابی به حداکثر پهنای باند ممکن متناسب با محدودیت‌های مسئله تنظیم نموده است. همچنین مشاهده می‌شود که قله‌های میان باندهای زیر ۱۱ dB - قرار گرفته‌اند.



شکل ۷- پاسخ شبیه‌سازی ساختار بهینه (ضریب بازتاب، عبور و جذب)

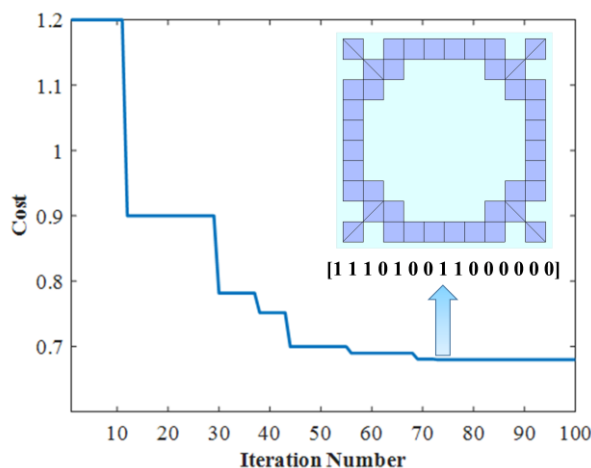
۵-۱- بررسی پایداری قطبش و پایداری زاویه‌ای

حفظ پاسخ مطلوب برای یک جاذب ریزموج در زوایای تابش و قطبش مختلف در کاربردهای عملی بسیار مهم است. این امر ناشی از عدم قطعیت ذاتی در زاویه تابش و قطبش امواج تابشی در اکثر سناریوهای واقعی است. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب مشخصه‌های جذب ساختار پیشنهادی را برای زوایای قطبش مختلف (تابش عمودی) و زوایای تابش مختلف (امواج مایل TE و TM) نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تقارن بالای الگوی پیشنهادی منجر به تغییرات ناچیز در نمودار جذب برای زوایای قطبش مختلف می‌شود. به طور مشابه، ۹ پایداری زاویه‌ای عالی ساختار را نشان می‌دهد که جذب بالا را حتی در زوایای تابش مایل (تا زاویه ۶۰ درجه برای مد TM و ۳۰ درجه برای مد TE) حفظ می‌کند.

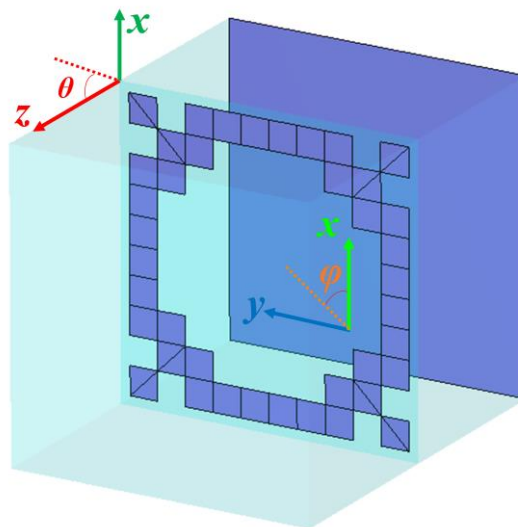
اگر فقط پهنای باند را در تابع هزینه لحاظ کنیم، احتمال خطای الگوریتم در موارد چند باندهای وجود دارد. بدین معنی که ممکن است در مواردی پهنای باند به شدت گسترده شود اما قله‌های ظاهر شده در نمودار S_{11} بالاتر از -۱۰ dB قرار بگیرند. در این حالت به جای جاذب فرابهن‌اند، جاذب دو بانده یا سه بانده خواهیم داشت. برای جلوگیری از بروز چنین خطاهایی، قله‌های S_{11} را نیز در تابع هزینه لحاظ نموده و در نهایت تابع هزینه را به صورت زیر تعریف کردیم:

$$CF = w_1 * (1 / BW_{-11dB}) + w_2 * \sum(Max(S_{11})) \quad (6)$$

که در آن BW_{-11dB} پهنای باند جذب -۱۱ dB (یک حاشیه ۱ دسی‌بلی برای خطاهای احتمالی فرآیند ساخت در نظر گرفته شده است)، $Max(|S_{11}|)$ نشان‌دهنده قله‌های نمودار S_{11} (قله‌ها) هستند، و $w_1 = 0.8$ و $w_2 = 0.2$ ، دو ضریبی هستند که با استفاده از آزمون و خطا به دست آمده‌اند. در روند تکرار الگوریتم بهینه‌سازی، CF به کمینه می‌رسد، که به معنای حداکثر کردن BW_{-11dB} و کمینه کردن قله‌های $|S_{11}|$ است.



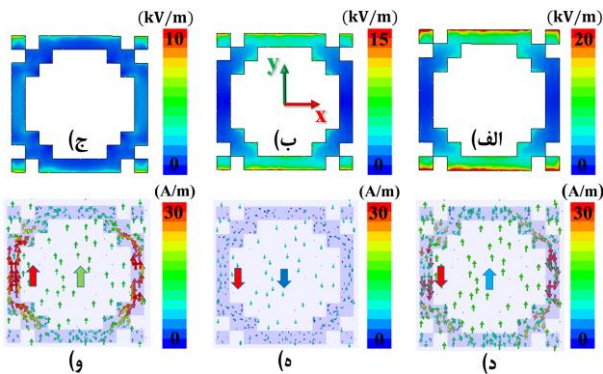
شکل ۵- تابع هزینه برحسب عدد تکرار، شکل الصاق شده، الگوی بهینه‌ی نهایی به همراه رشته دودویی متناظر با آن را در انتهای فرآیند بهینه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل ۶- طرح پیشنهادی بهینه به همراه زوایای θ و ϕ

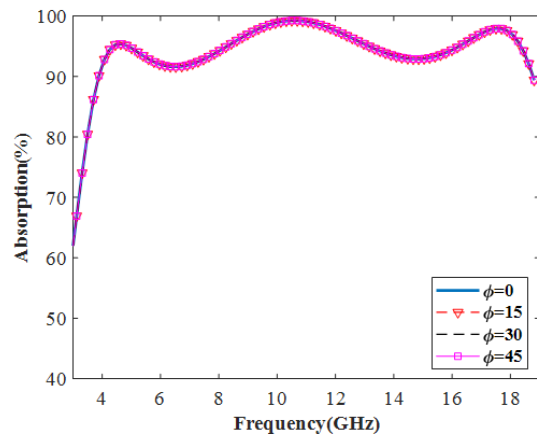
امپدانس با فضای آزاد برقرار می‌شود و موج تابشی به خوبی درون ساختار نفوذ کرده و پس از برخورد به صفحه زمین توسط آن بازتاب می‌شود. تداخل امواج تابش و بازتاب منجر به ایجاد تشدید و جذب امواج در ساختار می‌شود. طرح پیشنهادی ما شامل سه تشدید در فرکانس‌های ۴/۵، ۱۰/۵ و ۱۷/۶ گیگاهرتز است. استفاده از شکل‌دهی هوشمند الگوی فراماده از طریق الگوریتم BPSO امکان تنظیم دقیق این تشدیدها برای دستیابی به عملکرد جذب فرابهن‌باند را فراهم می‌کند. برای درک بهتر سازوکار جذب، شکل ۱۰ توزیع میدان الکتریکی القایی و جریان سطحی را روی هر دو لایه‌ی مقاومتی الگو و صفحه زمین را در فرکانس‌های تشدید مذکور تحت میدان تابشی با قطبش y در شکل نشان داده شده است.

هنگامی جاذب فراماده در معرض امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد، روی الگوی فراماده و صفحه‌ی زمین که از جنس یک فلز با مقاومت سطحی محدود است، در فرکانس‌های تشدید میدان‌های الکتریکی القا می‌گردد (شکل ۱۰-الف تا ج). این میدان‌ها الکترون‌های آزاد لایه مقاومتی فلزی را جابه‌جا می‌کنند و جریان‌های سطحی روی الگوی فراماده و صفحه زمین القا می‌کنند (شکل ۱۰-د تا و). جریان‌های سطحی باعث تلفات اهمی می‌شوند که شدت تلفات با چگالی جریان سطحی رابطه مستقیم دارد. چگالی جریان بالاتر منجر به اتلاف انرژی الکترومغناطیسی بیشتر می‌شود. با مقایسه شدت جریان بین الگوی فراماده و صفحه زمین (شکل ۱۰-د تا و) می‌توان دریافت که چگالی جریان و تلفات سطحی در الگوی فراماده نسبت به صفحه زمین بسیار بالاتر است. بنابراین، محل اصلی اتلاف انرژی الکترومغناطیسی الگوی فراماده است.

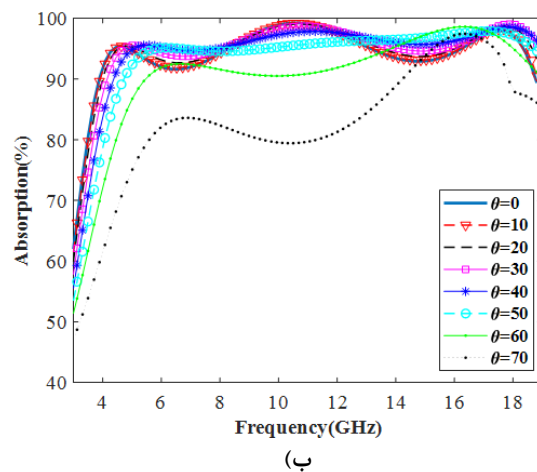
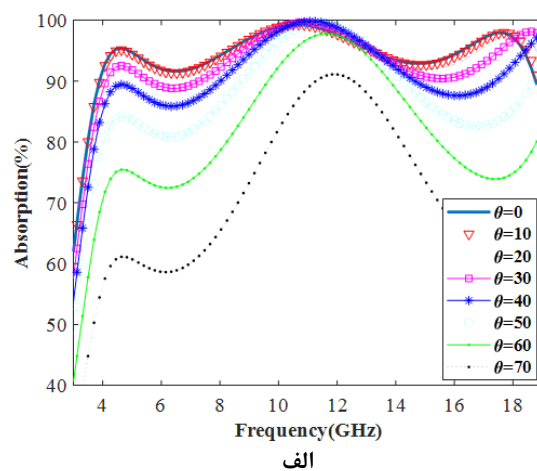


شکل ۱۰-الف-ج) قدر مطلق میدان الکتریکی القایی در الگوی فراماده در فرکانس (الف) ۴/۵ GHz، (ب) ۱۰/۵ GHz، (ج) ۱۷/۶ GHz. د-و) توزیع جریان سطحی در الگوی فراماده و صفحه زمین در فرکانس (د) ۴/۵ GHz، (ه) ۱۰/۵ GHz، (و) ۱۷/۶ GHz.

علاوه بر این، تحلیل جهت جریان‌های سطحی روی الگوی فراماده و صفحه زمین امکان شناسایی نوع تشدید را فراهم می‌کند. مشاهده می‌شود که در دو فرکانس تشدید اول جریان‌های سطحی الگو و صفحه زمین هم‌جهت هستند بنابراین ماهیت این دو تشدید الکتریکی است. اما در تشدید سوم این جریان‌ها در جهت‌های مخالف جاری



شکل ۸- نمودار جذب ساختار بهینه به ازای زوایای قطبش مختلف (ϕ)



شکل ۹- نمودار جذب ساختار بهینه به ازای زوایای تابش مختلف (θ) (الف) مد TE، (ب) مد TM

۵-۲- توضیح سازوکار جذب امواج ریزموج

جاذب‌های ریزموج فرامواد در واقع نوعی جاذب آنالوگ مداری هستند، به این معنی که در این ساختارها، جاذب مانند یک مدار الکتریکی عمل می‌کند و الگوی فراماده به عنوان یک مدار تشدید عمل می‌کند که در فرکانس‌های خاصی تشدید می‌کند. در این فرکانس‌های تشدید، تطبیق

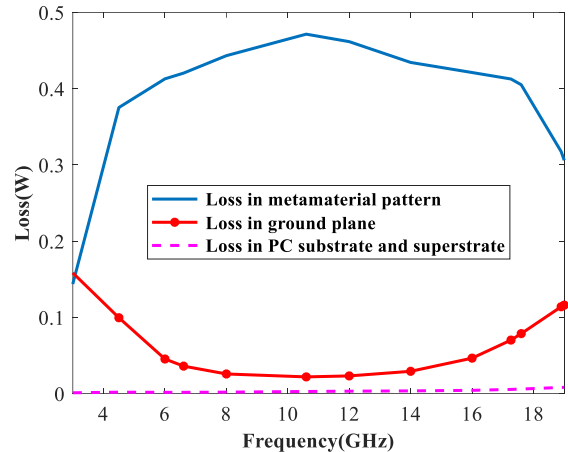
۷- نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش یک جاذب شفاف فراماده فراپهن باند طراحی و شبیه‌سازی گردید. جاذب پیشنهادی از یک زیرلایه و یک رولایه‌ی پلی-کربنات به ضخامت 4 mm تشکیل شده است. بخش زیرین زیرلایه، یک صفحه زمین پیوسته از جنس یک ماده مقاومتی شفاف مانند ITO با مقاومت سطحی $20 \Omega/\text{sq}$ قرار گرفته و روی آن یک الگوی فراماده از همان جنس صفحه زمین قرار می‌گیرد. برای طراحی الگوی فراماده از یک روش بهینه‌سازی هوشمند استفاده گردید. در این روش، سطح زیرلایه به چندین پیکسل تقسیم می‌شود و به هر پیکسل یک متغیر دودویی اختصاص داده می‌شود. مقدار "۱" نشان‌دهنده حضور و مقدار "۰" نشان‌دهنده عدم حضور ماده مقاومتی معین در یک پیکسل است. هدف، یافتن الگوی بهینه از ماده‌ی مقاومتی است که خواص الکترومغناطیسی مورد نظر را برآورده کند. با ایجاد یک ارتباط بین نرم‌افزار MATLAB (جهت اجرای کد بهینه‌سازی) و CST (جهت انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی) طرح بهینه بدست آمد. با استفاده از این روش، زمان طراحی به شدت کاهش می‌یابد و در عین حال عملکرد ساختار بهینه می‌گردد. جاذب پیشنهادی، بیش از ۹۰٪ امواج ریزموج با تابش عمودی را در پهنای باند گسترده ۳/۸-۱۸/۸۵ GHz را جذب می‌کند که به معنای پوشش تمامی باندهای فرکانسی هدف C, X و Ku می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به علت تقارن بالای الگوی پیشنهادی پهنای باند جذب مذکور به ازای زوایای قطبش مختلف هیچ تغییری نمی‌کند. علاوه بر این، پایداری زاویه‌ای بسیار خوب در زوایای تابش مایل (تا زاویه ۶۰ درجه برای مد TM و ۳۰ درجه برای مد TE) مشاهده می‌گردد.

۸- مراجع

- [1] W. Woltersdorff, "Über die optischen Konstanten d'inner Metallschichten im langwelligen Ultrarot," *Z. Phys.*, vol. 91, no. 3, pp. 230-252, 1934.
- [2] W. W. Salisbury, "Absorbent body for electromagnetic waves," *U.S. Patent 2,599,944*, Aug. 1952.
- [3] B. Chambers and A. Tennant, "Design of wideband Jaumann radar absorbers with optimum oblique incidence performance," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 18, pp. 1530-1532, 1994.
- [4] H. Li et al., "Phase-loss cascade combination method for multilayer ultrabroadband reconfigurable absorber," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 72, no. 2, pp. 522-532, 2024.
- [5] نیل برگی، یحیی، «طراحی و شبیه‌سازی رزوناتور فرامواد جهت بهبود پهنای باند»، فصلنامه پژوهش‌های نوین در سامانه‌های دفاع الکترونیکی، دوره ۲، شماره ۱، صص. ۱-۸، ۱۴۰۲.
- [6] Y. Xiong et al., "Ultra-thin optically transparent broadband microwave metamaterial absorber based on indium tin oxide," *Opt. Mater.*, vol. 132, p. 112745, 2022.
- [7] X. Bai et al., "An Ultra-wideband, wide-angle and transparent microwave absorber using indium tin oxide conductive films," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 523-527, 2024.

هستند، بنابراین با همدیگر یک حلقه جریانی را ایجاد می‌کنند که منجر به تشدید مغناطیسی می‌شود. شکل ۱۱ سهم اجزای مختلف جاذب شفاف پیشنهادی را در تلفات کلی ساختار، نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که الگوی فراماده پیکسل‌بندی شده نقش اصلی را در تلفات یا همان جذب امواج ایفا می‌کند، در حالی که لایه (صفحه زمین) بخش کمتری از امواج را جذب می‌کند. این امر به مقاومت سطحی محدود لایه مقاومتی و همچنین شکل الگوی فراماده مرتبط است. همچنین مطابق این شکل، سهم زیرلایه پلی‌کربنات در تلفات کلی ناچیز است.



شکل ۱۱- سهم عناصر مختلف ساختار جاذب پیشنهادی در تلفات توان (توان تابشی = ۰/۵ وات)

۶- روش ساخت و آزمون پیشنهادی

برای ساخت نمونه‌ی عملی پیشنهاد می‌گردد که از لایه‌نشانی مستقیم ITO با روش کندوپاش مگنترون در مد DC استفاده شود. لازم به ذکر است که فرآیند لایه‌نشانی نانومتري، یک فرآیند حساس و خطاپذیر است و تابع عوامل مختلف محیطی (دما، فشار، شرایط عمومی دستگاه و ...) است و برای دستیابی به مقاومت سطحی مورد نظر باید چندین مرحله تکرار و سعی و خطا انجام شود. بدین صورت که لایه نشانی روی نمونه‌های کوچک انجام شود و پس از هر بار لایه نشانی مقاومت سطحی لایه‌ی ایجاد شده با روش پروب چهار نقطه اندازه‌گیری شود و هر بار تنظیمات دستگاه (زمان یا نرخ لایه‌نشانی) متناسب با هدف پژوهش تغییر داده شود تا مقاومت سطحی حاصل شود. سپس بستره‌ی پلی‌کربنات اصلی که در ابعاد بزرگ تهیه است، تحت لایه‌نشانی با تنظیمات نمونه مطلوب قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود برای آنکه آزمون‌های جذب الکترومغناطیسی، دقت کافی را داشته باشند، نمونه‌ی اصلی در ابعاد بزرگ (40x40 cm) تهیه شود، اما آزمون‌های ما نشان داده است [۱۸] که حداقل ابعاد 20x20 cm نیز تا حد قابل قبولی پاسخگویی انجام آزمون‌ها خواهد بود. برای اندازه‌گیری دقیق ضخامت لایه‌ی ITO، استفاده از روش بیضی سنجی و میکروسکوپ نیروی اتمی پیشنهاد می‌شود. همچنین برای ایجاد الگوی فراماده، می‌توان از یکی از روش‌های حکاکی لیزری یا لیتوگرافی نوری بهره برد.

- [15] M. Shirmohammadkarimi et al., "Generalized phase-polarization cancellation for broadband radar cross-section reduction," *IEEE Access*, vol.11 ,pp. 98532-98541, 2023.
- [16] W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 1, pp.33-36,1974.
- [17] A. K. Jha and M.J. Akhtar, "A generalized rectangular cavity approach for determination of complex permittivity of materials," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 11, pp. 2632-2641, 2014.
- [18] S. Soghi et al., "Single-layer broadband optically transparent metamaterial absorber using gold thin film," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, early access, 2023.
- [19] A. Yousefpour, M. Hojjati, and J.-P. Immarigeon, "Fusion bonding/welding of thermoplastic composites," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 17, no. 4, pp. 303-341, 2004.
- [20] F. Ghiasvand et al., "Optimal design and implementation of inhomogeneous planar radome by perforating the host material," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 5, pp. 3751-3759, 2020.
- [21] F. Ghiasvand et al., "A frequency-independent inhomogeneous planar radome with high angular stability based on permittivity manipulating," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 151, 2022, Art. no. 154214.
- [8] D. Li et al., "Ultrabroadband metamaterial absorber based on effectively coupled multilayer HIS loaded structure with Dallenbach layer," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 70, no. 1, pp. 232-238, 2022.
- [9] H. Zhu et al., "A high Q-factor metamaterial absorber and its refractive index sensing characteristics," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 70 ,no. 12, pp. 5383-5391, 2022.
- [10] M. Amiri et al., "RF-self-powered sensor for fully autonomous soil moisture sensing," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 71, no. 3, pp. 1374-1387, 2023.
- [11] Z. Zhou et al., "Bayesian-inspired sampling for efficient machine-learning-assisted microwave component design," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 72, no. 2, pp. 996-1007, 2024.
- [12] M.J. Hajiahmadi et al., "Pixelated checkerboard metasurface for ultra-wideband radar cross section reduction," *Sci. Rep.*, vol. 7, 2017. art no. 11437.
- [13] B. Ghaderi et al., "Pixelated metasurface for dual-band and multi-polarization electromagnetic energy harvesting," *Sci. Rep.*, vol. 8, 2018, art no. 13227.
- [14] A. Ghadimi et al., "A systematic approach for mutual coupling reduction between microstrip antennas using pixelization and binary optimization," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 19, no. 12, pp. 2048-2052, 2020.