

طراحی و بهینه‌سازی آنتن سه‌باند تره‌رتزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مدل جنگل تصادفی

عبداله امیرآلی^{۱*}، احسان زارعیان جهرمی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات میدان، دانشگاه صنعتی شیراز، فارس، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز، فارس، ایران.

تاریخ دریافت:

۹ دی ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۳ اردیبهشت ماه ۱۴۰۵

چکیده

آنتن‌های چندباند تره‌رتزی به دلیل پیچیدگی و بده-بستان غیرخطی بین پارامترها، چالش‌برانگیز هستند. در این مقاله، یک چهارچوب بهینه‌سازی هوشمند مبتنی بر مدل نیابتی جنگل تصادفی و الگوریتم ژنتیک برای طراحی آنتن سه‌باند فشرده تره‌رتز ارائه شده است. ساختار آنتن طی دو مرحله از یک آنتن پچ مستطیلی ساده، با افزودن بریدگی‌های گوشه و شکاف U-شکل ایجاد می‌گردد. برای غلبه بر هزینه محاسباتی بالای شبیه‌سازی‌های مستقیم، ابتدا ۲۴۰ شبیه‌سازی پارامتریک در نرم افزار شبیه سازی CST انجام شده و یک مدل جنگل تصادفی با دقت بالا ($R^2 > 0.99$) آموزش داده می‌شود. سپس، الگوریتم ژنتیک با استفاده از این مدل سریع (پیش‌بینی در کمتر از ۱ ثانیه) ابعاد بهینه را جستجو می‌کند. روش پیشنهادی، هزینه محاسباتی را بیش از ۹۰٪ نسبت به بهینه‌سازی مستقیم، کاهش می‌دهد. آنتن نهایی، سه باند تشدید در فرکانس‌های ۱/۱۷، ۱/۴۶ و ۱/۷۶ تره‌رتز با تلفات بازگشتی بهتر از ۱۰- دسی‌بل دارد که برای کاربردهای حسگری چندطیفی مناسب است.

واژه‌های کلیدی: آنتن، تره‌رتز، الگوریتم ژنتیک، جنگل تصادفی، مدل نیابتی.

Design and Optimization of a Tri-Band Terahertz Antenna Using a Genetic Algorithm Based on Random Forest Model

Abdollah Amiralil¹, Ehsan Zareian-Jahromi^{2*}

1. M. S. Student in Telecommunications, Shiraz University of Technology, Fars, Iran.

2. Associate Prof., Department of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Fars, Iran

Abstract

Multi-band terahertz antennas are challenging due to complexity and nonlinear trade-offs between design parameters. The novelty of this paper is the presentation of an intelligent optimization framework based on a random forest surrogate model and a genetic algorithm for the design of a compact tri-band terahertz antenna. The antenna structure is created in two steps from a simple rectangular patch by adding corner notches and a U-shaped slot. To overcome the high computational cost of direct simulations, 240 parametric simulations are first performed in CST, and a random forest model with high accuracy ($R^2 > 0.99$) is trained. Then, the genetic algorithm uses this fast model (prediction in less than 1 second) to search for the optimal dimensions. The proposed method reduces the computational cost by more than 90% compared to direct optimization. The final optimized antenna has three resonance bands at frequencies of 1.17, 1.46, and 1.76 THz with $|S_{11}| < -10$ dB, making it suitable for multispectral sensing applications.

Key words: Antenna, terahertz, genetic algorithm, random forest, surrogate model.

۱- پیشینه

محدوده فرکانسی تراهرتز که به طور کلی طیف الکترومغناطیسی بین ۰/۱ تا ۱۰ تراهرتز را پوشش می‌دهد، بین محدوده‌های میکروویو و مادون قرمز قرار دارد. فراتر از قابلیت تصویربرداری، مزیت اصلی فناوری تراهرتز در حوزه طیف‌نگاری نهفته است [۱]. بسیاری از مولکول‌های پیچیده، ترکیبات شیمیایی، و مواد بیولوژیکی، دارای اثر انگشت طیفی مشخصی در این محدوده هستند که امکان شناسایی دقیق مواد را از راه دور و به صورت غیر مخرب ممکن می‌سازد [۲].

Praveena و همکاران در بررسی خود نشان داده‌اند که طیف‌نگاری تراهرتز، ابزاری قدرتمند در زمینه‌هایی مانند کنترل کیفیت دارویی، از جمله بررسی پوشش قرص‌ها، و همچنین شناسایی مواد منفجره است [۳]. Singh و Gezimati بیان کرده‌اند که در حوزه پزشکی، توانایی امواج تراهرتز در تمایز بافت سالم از بافت سرطانی، افق‌های جدیدی را در تشخیص زود هنگام بیماری‌ها گشوده است [۴]. Malviya و Pant در مروری جامع نشان داده‌اند که با افزایش فرکانس در طراحی آنتن‌های تراهرتز، چالش‌هایی اساسی ظهور می‌کنند [۵]. Elalaouy و همکاران بیان کرده‌اند که مشکل اصلی در طراحی آنتن‌های تراهرتز به خواص مواد بازمی‌گردد؛ چرا که رساناهای رایج تلفات اهمی بالایی از خود نشان می‌دهند و زیرلایه‌های دی‌الکتریک رایج نیز دارای تلفات دی‌الکتریک قابل توجهی هستند [۶].

Ahammed و همکاران بیان کرده‌اند که تلفات ذاتی مواد، مستقیماً منجر به چالش بزرگ دوم، یعنی بهره و بازدهی تشعشعی پایین می‌شود که یک محدودیت اساسی در آنتن‌های ریزنواری^۱ مرسوم تراهرتز است [۷]. علاوه بر این، Benlakehal و همکاران بیان کرده‌اند که آنتن‌های تشدیدگر مرسوم، ذاتاً از پهنای باند باریک رنج می‌برند [۸]. به گفته آن‌ها، برای غلبه بر این محدودیت‌های اساسی، محققان مجبور به فاصله گرفتن از طرح‌های ساده و حرکت به سمت ساختارهای پیشرفته‌تری برای دستیابی به اهداف مد نظر شده‌اند. تحقیقات گسترده‌ای بر روی طراحی آنتن‌های چندباند در حوزه تراهرتز متمرکز شده است تا بتوانند چندین کاربرد را به طور همزمان پوشش دهند. یک رویکرد رایج، استفاده از ساختارهای پیچیده فراماده^۲ است؛ به عنوان مثال، Hamza و همکاران در پژوهش خود نشان داده‌اند که با استفاده از یک ساختار مبتنی بر فراماده می‌توان به گزینش‌پذیری طیفی هدفمند در چند باند دست یافت [۹]. در پژوهشی دیگر، Amraoui و همکاران، از یک سطح فرکانس گزین مبتنی بر فراسطح برای بهبود بهره و جداسازی باندهای فرکانسی در یک آنتن دو بانده تراهرتز استفاده کرده‌اند [۱۰]. همچنین، استفاده از آنتن‌های تشدیدگر دی‌الکتریک به عنوان جایگزینی برای آنتن‌های پیچ فلزی مرسوم، مورد بررسی قرار گرفته است؛ به طوری که در یک پژوهش، با بارگذاری گرافن روی یک

آنتن با تشدیدگر عایقی، عملکرد دو بانده قابل تنظیم به دست آمده است [۱۱]. محققان دیگر، با موفقیت آنتن‌های تشدیدگر دی‌الکتریک سه‌باند را برای کاربردهای تراهرتز ارائه کرده‌اند [۱۲]. برخی مقالات نیز پا را فراتر نهاده و آنتن‌های چند ورودی-چند خروجی (MIMO^۳) سه‌باند را برای کاربردهای نسل آینده بهینه‌سازی کرده‌اند [۱۳]. در نهایت، استفاده از هندسه‌های پیچیده‌ای مانند فراکتال هیلبرت^۴ مبتنی بر گرافن نیز برای دستیابی به عملکرد چندباند در ساختارهای MIMO بررسی شده است [۱۴].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به کاربرد یادگیری ماشین در طراحی آنتن‌های تراهرتز پرداخته‌اند. به عنوان مثال، در [۱۵] از الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عملکرد آنتن دو درگاه تراهرتزی استفاده شده است. همچنین Belhaouari و همکاران در پژوهش خود نشان داده‌اند که با ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی می‌توان آنتن تراهرتز مبتنی بر ساختار PBG را به طور مؤثری بهینه‌سازی کرد [۱۶]. در [۱۷] نیز، روش‌های رگرسیون مبتنی بر جنگل تصادفی و جنگل‌های اضافی برای پیش‌بینی عملکرد آنتن‌های هوشمند تراهرتز در کاربردهای 6G ارائه شده است.

این مطالعات نشان می‌دهند که دستیابی به عملکرد چندباند امکان‌پذیر است، اما تقریباً همیشه نیازمند معرفی هندسه‌های ساختاری پیچیده (مانند شکاف‌ها، لایه‌های فراماده، یا اشکال فراکتال) می‌باشد. با افزایش تعداد باندها، تعداد پارامترهای هندسی کلیدی نیز افزایش می‌یابد. در چنین ساختارهای پیچیده‌ای، یک بده-بستان غیرخطی و قوی بین پارامترها حاکم است. تنظیم دستی این پارامترها از طریق شبیه‌سازی‌های سعی و خطا برای رسیدن دقیق به چندین فرکانس هدف (مانند فرکانس‌های مورد نیاز برای طیف‌نگاری)، فرآیندی بسیار زمان‌بر، دشوار، و غالباً ناکارآمد است.

۲- مقدمه

با وجود تلاش‌های گسترده، همچنان یک خلأ تحقیقاتی در زمینه طراحی خودکار و کم‌هزینه آنتن‌های سه‌باند تراهرتزی برای فرکانس‌های هدف خاص (مانند ۱/۱۷، ۱/۴۶ و ۱/۷۶ تراهرتز) احساس می‌شود. اکثر روش‌های موجود یا مبتنی بر طراحی دستی و زمان‌بر هستند یا به بهینه‌سازی مستقیم با محاسبات زیاد متکی می‌باشند. برای غلبه بر چالش بهینه‌سازی دستی، که فرآیندی زمان‌بر و مبتنی بر سعی و خطا است، استفاده از روش‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری، راهکاری بسیار کارآمد است [۱۸]. Huang و همکاران بیان کرده‌اند که الگوریتم‌های تکاملی، به ویژه الگوریتم ژنتیک (GA^۵) به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی قدرتمند، به طور گسترده‌ای برای طراحی آنتن‌های ریزنواری استفاده

⁴ Hilbert Fractal

⁵ Genetic Algorithm

¹ Microstrip Antennas

² Metamaterial

³ Multiple Input Multiple Output

شده است [۱۹]. توانایی GA در کاوش فضاهای طراحی پیچیده، آن را به گزینه‌ای موفق جهت بهینه‌سازی ابعاد آنتن‌های مینیاتوری و چندباند تبدیل کرده است [۲۰-۲۲].

در کنار الگوریتم‌های بهینه‌ساز، یادگیری ماشین نیز به عنوان یک رویکرد نوین برای تسریع فرآیند طراحی معرفی شده است. Haque و همکاران در پژوهش خود تأیید کرده‌اند که مدل‌های یادگیری ماشین قابلیت پیش‌بینی سریع پارامترهای کلیدی عملکرد آنتن مانند فرکانس تشدید را دارند [۲۳]. این قابلیت پیش‌بینی، به ویژه در حوزه ترانز، جایی که شبیه‌سازی‌ها می‌توانند سنگین باشند، مورد بررسی قرار گرفته و کارایی خود را نشان داده است [۲۴]. Mir و همکاران در پژوهش خود تأیید کرده‌اند که روش‌های پیشرفته‌ای مانند یادگیری عمیق، توانایی خودکارسازی کامل فرآیند طراحی و دستیابی به آنتن‌هایی با عملکرد بالا را دارند [۲۵]. استفاده مستقیم از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی مانند GA یا PSO^۱ در کنار شبیه‌سازهای الکترومغناطیسی سه‌بعدی، یک فرآیند بسیار زمان‌بر از نظر محاسباتی است. برای حل این گلوگاه محاسباتی، رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر مدل نیابتی به عنوان یک راه‌حل کارآمد و قدرتمند مطرح شده است [۲۶]. در این روش، به جای شبیه‌ساز الکترومغناطیسی، از یک مدل جایگزین (نیابتی) که مبتنی بر یادگیری ماشین است، برای پیش‌بینی سریع و تقریباً آنی عملکرد آنتن استفاده می‌شود. این مدل‌ها می‌توانند فرآیند طراحی را با هزینه‌های محاسباتی بسیار کمتر مدیریت کنند. به عنوان مثال، در پژوهش [۲۷]، Jiao و همکاران نشان داده‌اند که با استفاده از یک چارچوب بهینه‌سازی چند-نیابتی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان آرایه‌های آنتن موج میلی‌متری را به طور مؤثری طراحی کرد. Wang و همکاران در پژوهش خود نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی می‌توانند به عنوان مدل نیابتی دقیق برای طراحی آنتن‌های چند هدفه مورد استفاده قرار گیرند [۲۸]. همچنین در پژوهشی دیگر، یک آنتن ترانزتری پهن‌بند از طریق آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی پیشرو و با بهره‌گیری از ساختار زمین ناقص و المان‌های پارازیتی طراحی شده است [۲۹]. در تحقیق دیگری الگوریتم بهینه‌سازی PSO نیز به طور موثر با مدل‌های نیابتی مبتنی بر ML^۲ ترکیب شده است تا سنتز آنتن با تعداد شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی بسیار کمتر انجام شود [۳۰]. در پژوهشی جدید، Engin و همکاران یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر درخت تصمیم بوسه‌گردانی برای طراحی آنتن ارائه داده‌اند. روش پیشنهادی آنها نسبت به روش‌های متداول مانند بهینه‌سازی بیزی و شبکه‌های عصبی، بیش از ۵۰٪ همگرایی سریع‌تر داشته و بسته به پیچیدگی مسئله، بین ۷ تا ۵۴ درصد بهبود در مقدار تابع هدف نشان داده است [۳۱].

با توجه به اینکه حسگرهای چندطیفی قابلیت شناسایی همزمان چندین اثر انگشت طیفی را دارند، در این مقاله، یک چارچوب بهینه‌سازی

هوشمند مبتنی بر مدل نیابتی برای طراحی آنتن سه‌باند ترانزتری ارائه شده است. در این راستا، نخستین نوآوری این مقاله استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان مدل نیابتی در طراحی آنتن سه‌باند ترانزتری است. در حالی که پژوهش‌های پیشین عمدتاً از شبکه‌های عصبی استفاده کرده‌اند، جنگل تصادفی با دقت بالاتر ($R^2 > 0.99$) و نیاز به داده کمتر، گزینه‌ای کارآمدتر به شمار می‌رود. دومین نوآوری، ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل نیابتی جنگل تصادفی برای بهینه‌سازی همزمان سه باند فرکانسی هدف است. این رویکرد ترکیبی (تکاملی+یادگیری ماشین) نسبت به روش‌های پیشین مبتنی بر شبکه عصبی، از دقت بالاتر و هزینه محاسباتی کمتری برخوردار است. سومین نوآوری، فرآیند طراحی گام‌به‌گام (سه‌باند → دو‌باند → تک‌باند) است که نشان می‌دهد چگونه یک ساختار ساده به تدریج پیچیده شده و سپس با روش هوشمند بهینه‌سازی می‌شود.

در ادامه مقاله، ساختار آنتن پیشنهادی، فرآیند کامل تولید داده، آموزش مدل‌های هوش مصنوعی، و اجرای الگوریتم بهینه‌سازی به تفصیل شرح داده خواهد شد و در نهایت، عملکرد مطلوب آنتن بهینه‌شده نهایی از طریق شبیه‌سازی تأیید می‌گردد. کاربرد اصلی آنتن معرفی شده، حسگری چندطیفی (چندباند) در حوزه ترانزتری است. در کاربرد حسگری، آنتن در یک سیستم طیف‌نگاری (شامل منبع، آشکارساز، و نمونه مورد آزمایش) قرار می‌گیرد.

۳- طراحی و تحلیل ساختار آنتن پیشنهادی

ساختار آنتن پیشنهادی در این مقاله، یک آنتن ریزنواری مسطح است که برای دستیابی به عملکرد سه باند، طراحی شده است. لازم به ذکر است که روند طراحی، طی سه مرحله از طراحی ساختار آنتن پایه تا ساختار آنتن مورد نظر، شرح داده خواهد شد.

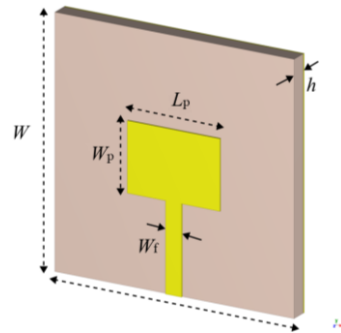
۳-۱- مرحله اول: ساختار آنتن پایه

فرآیند طراحی با یک آنتن بیج مستطیلی استاندارد به عنوان ساختار پایه آغاز می‌شود. هدف از این آنتن اولیه، ایجاد یک تشدیدگر ساده در محدوده ترانزتری است. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار CST Microwave Studio انجام شده است. زیرلایه مورد استفاده، سیلیکون با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 11/9$ و ضخامت $h = 10 \mu m$ است و به علاوه، لایه‌های رسانا (بیج و صفحه زمین) نیز از جنس طلا با ضخامت $t_s = 1 \mu m$ در نظر گرفته شده‌اند. ابعاد زیرلایه توسط $W = 150 \mu m$ و $L = 150 \mu m$ تعیین می‌شود، در حالی که $W_p = 58 \mu m$ ، $L_p = 42 \mu m$ بیانگر ابعاد بیج تشعشی هستند و $W_f = 10 \mu m$ ، عرض خط تغذیه را مشخص

² Machine Learning

¹ Particle Swarm Optimization

می‌کند. ساختار کلی آنتن پایه و پارامترهای هندسی آن در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- ساختار آنتن پایه به همراه پارامترهای هندسی آن.

ابعاد اولیه پچ تشعشی به صورت تصادفی انتخاب نشده‌اند، بلکه بر اساس فرمول‌های کلاسیک طراحی آنتن ریزنواری برای مود TM_{10} محاسبه گردیده‌اند [۳۲]. در ابتدا، عرض پچ (W_p) از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

که در این رابطه c سرعت نور در فضای آزاد است، f_r فرکانس تشدید هدف می‌باشد، و ϵ_r بیانگر ثابت دی‌الکتریک نسبی زیرلایه است.

در گام دوم، به دلیل اینکه میدان‌های الکتریکی هم در داخل زیرلایه و هم در هوای اطراف پچ منتشر می‌شوند، باید ثابت دی‌الکتریک مؤثر را محاسبه کرد. این پارامتر که محیط ترکیبی را مدل‌سازی می‌کند، طبق رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

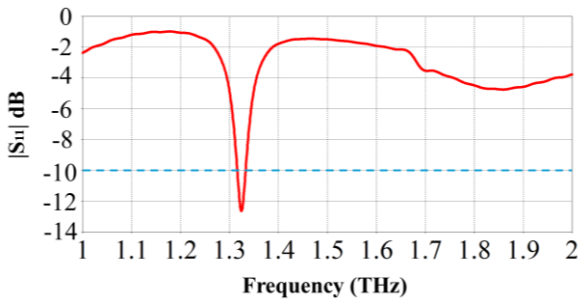
که در آن h نشان دهنده ضخامت زیرلایه دی‌الکتریک است. به دلیل پدیده انتشار میدان‌های لبه‌ای، آنتن از نظر الکتریکی بلندتر از ابعاد فیزیکی‌اش به نظر می‌رسد. مقدار این افزایش طول که برای تعیین دقیق طول رزونانس ضروری است، از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

در نهایت، طول پچ (L_p) با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای (ΔL) از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$L_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

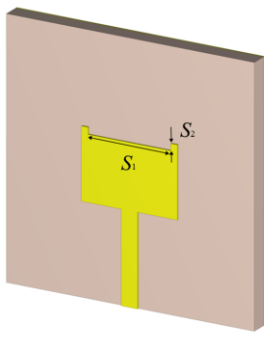
نمودار تلفات بازگشتی آنتن پایه در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، آنتن دارای یک باند تشدید در فرکانس $1/33$ تراهرتز با عمق تشدید بهتر از 10 -دسی‌بل است. این ساختار به عنوان یک آنتن تک‌باند کارآمد عمل می‌کند، اما برای کاربردهای چندبنده، نامطلوب است.



شکل ۲- نمودار تلفات بازگشتی شبیه‌سازی شده برای آنتن پایه در شکل ۱.

۳-۲- مرحله دوم: ایجاد باند کاری دوم

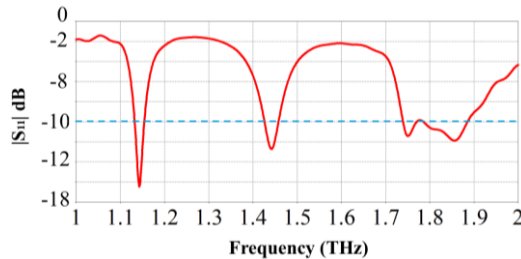
در گام دوم، به دنبال ایجاد یک باند تشدید اضافی برای دستیابی به عملکرد دو بانده هستیم. برای این منظور، به جای افزودن شکاف‌های پیچیده، از یک تکنیک مؤثر یعنی ایجاد بریدگی مستطیلی شکلی با طول $S_1 = 50 \mu m$ و عرض $S_2 = 4 \mu m$ در بالای پچ استفاده می‌کنیم. ساختار اصلاح‌شده، که ما آن را آنتن دوم می‌نامیم، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- ساختار آنتن دوم پیشنهادی به همراه پارامترهای هندسی آن.

این بریدگی‌ها به عنوان یک اختلال در ساختار پچ عمل می‌کنند و مسیر جریان سطحی را، به‌ویژه برای مودهای فرکانس بالاتر، تغییر می‌دهند. لازم به ذکر است که مود اصلی در فرکانس $1/33$ تراهرتز مختل نمی‌شود. نتیجه شبیه‌سازی تلفات بازگشتی آنتن دوم در شکل ۴ ارائه شده است:

دسی بل، ۱/۴۲ تراهرتز با عمق ۱۲/۵- دسی بل، و ۱/۷۵ تراهرتز با عمق ۱۲- دسی بل می باشد. لازم به ذکر است که در شکل ۴ یک قله تشدید دیگر در حدود ۱/۸۷ تراهرتز قابل مشاهده است. در ساختار نهایی آنتن که در انتها خواهیم دید، این باند تشدید چهارم با باند تشدید سوم ترکیب شده و عملکرد سه بانده مد نظر، حاصل می گردد.

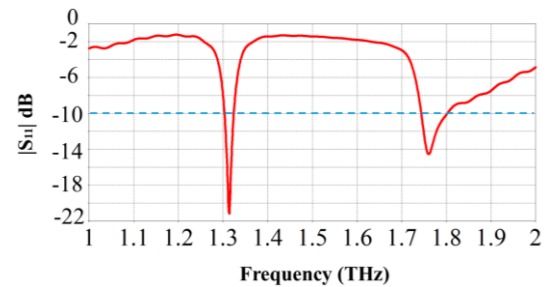


شکل ۴- نمودار تلفات بازگشتی شبیه سازی شده برای آنتن سوم در شکل ۵.

این فرآیند تکاملی سه مرحله ای (از آنتن اول تا آنتن سوم) تأیید می کند که ساختار پیشنهادی در شکل ۵، پتانسیل بسیار خوبی برای عملکرد سه بانده در حوزه تراهرتز دارد. با این حال، فرکانس های تشدید بدست آمده نتیجه ابعاد هندسی خاصی هستند که در این فرآیند طراحی مبتنی بر شبیه سازی های پارامتریک، استفاده شده اند. در یک کاربرد واقعی (مثال: کاربرد حسگری)، نیاز است که آنتن دقیقاً در فرکانس های هدف (مثال: فرکانس های اثر انگشت سه ماده شیمیایی خاص) تشدید کند. این ساختار در حال حاضر، دارای پارامترهای هندسی متعددی مانند طول و عرض پیچ، ابعاد بریدگی های گوشه، و طول و عرض شکاف U-شکل است. این پارامترها به شدت بر عملکرد آنتن در هر سه باند تأثیر گذارند؛ به گونه ای که تغییر در یکی از آنها، هر سه باند فرکانسی را به صورت همزمان جابجا می کند. بنابراین، تنظیم دستی این پارامترها برای رسیدن همزمان به سه فرکانس هدف خاص با تطبیق امپدانس مطلوب، فرآیندی بسیار پیچیده و غیرخطی است. این پیچیدگی، نیاز به یک روش بهینه سازی خودکار و هوشمند را که در بخش بعدی مقاله معرفی می شود، توجیه می کند.

۴- روش بهینه سازی مبتنی بر مدل نیابتی

فرآیند طراحی آنتن سه بانده پیشنهادی، مستلزم مدیریت یک بده-بستان پیچیده و غیرخطی بین پارامترهای هندسی متعدد است. اتکا به روش های سنتی بهینه سازی مانند شبیه سازی های پارامتریک جامع، به دلیل هزینه محاسباتی زیاد عملاً امکان پذیر نیست. برای حل این چالش، در این مقاله، یک روش بهینه سازی مبتنی بر مدل نیابتی را به کار گرفته ایم. در این روش، ابتدا مدل هوش مصنوعی جنگل تصادفی با استفاده از یک مجموعه داده اولیه آموزش داده می شود تا رفتار آنتن را با دقت بالا و در چند ثانیه پیش بینی کند. پس از اعتبارسنجی، این مدل نیابتی سریع، جایگزین شبیه ساز CST در یک حلقه بهینه سازی سراسری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک می شود. این فرآیند سه مرحله ای (تولید داده، آموزش مدل، و بهینه سازی) به ما اجازه می دهد تا فضای

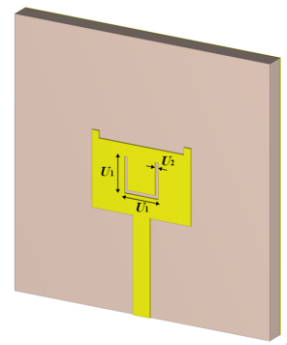


شکل ۴- نمودار تلفات بازگشتی شبیه سازی شده برای آنتن دوم در شکل ۳.

باند تشدید جدید با فرکانس مرکزی ۱/۷۷ تراهرتز و عمق تشدید عالی (تلفات بازگشتی ۱۵- دسی بل) بدست آمده است. به علاوه، باند تشدید اصلی در ۱/۳۳ تراهرتز نه تنها حفظ شده، بلکه تطبیق امپدانس آن به طور چشمگیری بهبود یافته و به ۲/۵- دسی بل رسیده است. بنابراین، با یک تغییر ساختاری ساده، آنتن تک بانده به یک آنتن دو بانده با عملکرد مطلوب تبدیل شد. در ادامه، به دنبال سه بانده ساختار آنتن بدست آمده خواهیم بود.

۳-۳- مرحله سوم: آنتن سه بانده نهایی

در گام نهایی فرآیند طراحی، هدف ما افزودن باند تشدید سوم به عملکرد قبلی حاصله است. دستیابی به سه باند مجزا، قابلیت آنتن را برای کاربردهای حسگری چندطیفی به طور چشمگیری افزایش می دهد، زیرا امکان شناسایی همزمان سه اثر انگشت طیفی مجزا را فراهم می کند. جهت دستیابی به هدف سه بانده شدن، یک شکاف U-شکل با طول بازوهای برابر $U_1 = 20 \mu m$ و ضخامت $U_2 = 2 \mu m$ در وسط پیچ اصلی ایجاد می کنیم. ساختار آنتن سوم پیشنهادی در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- ساختار آنتن سوم پیشنهادی به همراه پارامترهای هندسی آن.

این شکاف U-شکل به عنوان یک تشدیدگر اضافی عمل می کند که طول الکتریکی آن، فرکانس تشدید سوم را تعیین می کند. نتایج شبیه سازی ساختار پیشنهادی در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که به وضوح دیده می شود، افزودن شکاف U-شکل سبب ایجاد باند تشدید سوم شده است. آنتن نهایی اکنون دارای سه باند تشدید مشخص در فرکانس های تقریبی ۱/۱۵ تراهرتز با عمق ۱۷-

طراحی پیچیده آنتن را به طور کارآمد کاوش کرده و به یک راه حل بهینه سراسری دست یابیم. در ادامه، فرآیند سه مرحله‌ای ذکر شده به تفصیل توضیح داده می‌شود.

۴-۱- مرحله اول: تولید داده

اولین قدم برای ساخت مدل‌های هوشمند، ایجاد یک مجموعه داده جامع برای آموزش است. بدین منظور، مراحل زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم.

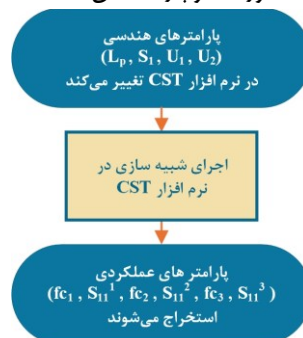
۱. **انتخاب پارامترهای ورودی:** ابتدا پارامترهای هندسی کلیدی آنتن سوم (شکل ۵) را که بیشترین تأثیر بر هر سه باند کاری فرکانسی دارند، شناسایی می‌کنیم. این فرآیند به ۴ پارامتر زیر به عنوان ورودی منتج می‌شود:
 - L_p (طول پچ)
 - S_1 (طول بریدگی‌های گوشه)
 - U_1 (طول شکاف U-شکل)
 - U_2 (ضخامت شکاف U-شکل)

۲. **اجرای شبیه‌سازی پارامتریک:** مقادیر این ۴ پارامتر ورودی، در محدوده‌های مشخصی در نرم‌افزار CST تغییر داده شده و ۲۴۰ شبیه‌سازی میدانی انجام می‌شود.

۳. **استخراج پارامترهای خروجی:** پس از اجرای هر شبیه‌سازی، نتایج کلیدی عملکرد آنتن استخراج می‌شود. از آنجایی که یک آنتن سه‌باند مد نظر است، به ۶ پارامتر خروجی زیر نیاز داریم:

- f_{c1} (فرکانس تشدید باند اول)
- $|S_{11}^1|$ (عمق تلفات بازگشتی در باند اول)
- f_{c2} (فرکانس تشدید باند دوم)
- $|S_{11}^2|$ (عمق تلفات بازگشتی در باند دوم)
- f_{c3} (فرکانس تشدید باند سوم)
- $|S_{11}^3|$ (عمق تلفات بازگشتی در باند سوم)

در پایان این مرحله، یک جدول با ۲۴۰ ردیف داریم که هر ردیف، شامل ۴ ورودی و ۶ خروجی است. در شکل زیر، مراحل تولید داده‌های خروجی و ورودی به صورت فلوجارت نشان داده شده است.



شکل ۷- فرآیند تولید مجموعه داده با استفاده از شبیه‌سازی پارامتریک در CST.

۴-۲- مرحله دوم-آموزش مدل‌های نیابتی

در این مقاله، از الگوریتم جنگل تصادفی برای ساخت مدل نیابتی استفاده می‌شود. جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری ماشین گروهی است که با ساختن تعداد زیادی درخت تصمیم، می‌تواند روابط پیچیده و غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را با دقت بالایی یاد بگیرد.

لازم به ذکر است که به جای یک مدل پیچیده، ۶ مدل جنگل تصادفی مجزا در نرم‌افزار MATLAB آموزش داده شده است. این مدل‌ها، ۶ پارامتر خروجی بیان شده (فرکانس تشدید و عمق تلفات بازگشتی در باندهای کاری) را بر اساس ۴ پارامتر ورودی (ابعاد هندسی آنتن نهایی) پیش‌بینی می‌کنند.

این شش مدل در کنار هم می‌توانند عملکرد آنتن را برای هر ترکیب دلخواه از ابعاد هندسی، در زمانی از مرتبه چند ثانیه پیش‌بینی کنند. در حالی که برای اجرای هر یک از ۲۴۰ ترکیب‌های ابعاد ساختاری در نرم‌افزار CST، زمانی در حدود ۷ دقیقه با توجه به سخت‌افزار دسترس لازم بود.

۴-۳- مرحله سوم: بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

در مرحله نهایی، از الگوریتم ژنتیک در جعبه ابزار بهینه‌سازی سراسری MATLAB، برای یافتن بهترین ابعاد هندسی استفاده می‌کنیم. جهت درک بهتر، موارد زیر را تعریف می‌کنیم:

۱. **تابع هزینه:** در ابتدا، یک تابع هزینه تعریف می‌شود. این تابع، ابعاد پیشنهادی از GA را می‌گیرد و آن‌ها را به ۶ مدل سریع جنگل تصادفی می‌دهد.

۲. **محاسبه خطا:** تابع هزینه، خطای بین فرکانس‌های پیش‌بینی شده (f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}) و فرکانس‌های هدف دلخواه را محاسبه می‌کند.

۳. **جریمه:** همچنین اگر هر یک از مقادیر $|S_{11}|$ در هر باند فرکانسی کاری، بدتر از حد مطلوب (۱۰- دسی‌بل) باشند، جریمه‌ای سنگین به تابع هزینه اضافه می‌شود.

۴. **همگرایی:** الگوریتم ژنتیک در نهایت مجموعه‌ای از ابعاد هندسی را پیدا می‌کند که تابع هزینه را به حداقل می‌رساند. همه این مراحل به صورت فلوجارت در شکل ۸ نمایش داده شده است.

۴-۴- تعریف تابع برازندگی

به‌منظور هدایت الگوریتم ژنتیک به سمت ابعاد بهینه، یک تابع برازندگی تک‌هدفه با محدودیت‌های خارجی تعریف شده است. هدف اصلی این تابع، کمینه‌سازی مجموع خطای مطلق بین فرکانس‌های تشدید پیش‌بینی شده توسط مدل نیابتی و فرکانس‌های هدف است، در حالی که همزمان شرط تطبیق امپدانس را در هر سه باند تضمین می‌کند. رابطه ریاضی تابع برازندگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

- η_i : تابع جریمه برای تضمین تطبیق امیدانس در باند i -ام است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta_i = f(x) = \begin{cases} \lambda, & \text{if } |S_{11i, pred}| > -10 \text{ dB} \\ 0, & \text{if } |S_{11i, pred}| \leq -10 \text{ dB} \end{cases} \quad (6)$$

که در اینجا λ یک عدد مثبت بسیار بزرگ (مثل ۱۰۰ یا ۱۰۰۰) است که در صورت عدم برقراری شرط تشدید در هر یک از باندها، به تابع هزینه افزوده می‌شود تا آن پاسخ از فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک حذف گردد.

۵- ارائه و تحلیل نتایج

در این بخش، ابتدا دقت مدل‌های نیابتی جنگل تصادفی که برای پیش‌بینی عملکرد آنتن آموزش داده شدند، ارزیابی می‌شود. سپس، عملکرد آنتن نهایی که ابعاد آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است، از طریق یک شبیه‌سازی تأییدی در نرم‌افزار CST به طور کامل تحلیل و ارائه می‌شود.

۵-۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی

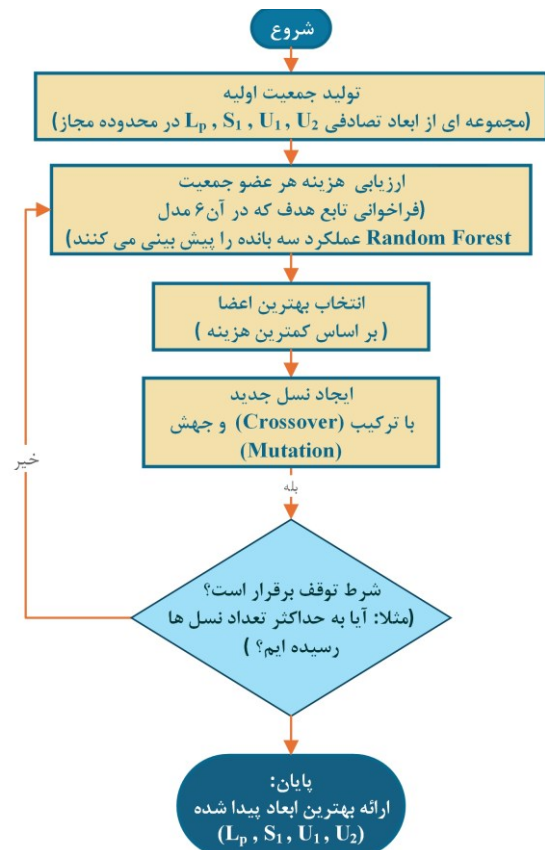
در ابتدا به بررسی اعتبار مدل‌های نیابتی می‌پردازیم. همانطور که قبلاً بیان شد، از الگوریتم جنگل تصادفی برای ساخت مدل‌های نیابتی استفاده کرده‌ایم. برای ارزیابی دقت این مدل‌ها، از دو معیار استاندارد آماری استفاده می‌شود: میانگین مربعات خطا (MSE^1) و ضریب تعیین R^2 . این معیارها به ما کمک می‌کنند تا بفهمیم پیش‌بینی‌های مدل چقدر به مقادیر واقعی به دست آمده از شبیه‌سازی CST نزدیک هستند. مقدار MSE از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

که در آن n تعداد نمونه‌های تست، y_i مقدار واقعی (خروجی شبیه‌ساز CST) و \hat{y}_i مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل هوش مصنوعی است. ضریب تعیین که نشان‌دهنده میزان تطابق مدل با داده‌ها است، از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

که در آن \bar{y} میانگین مقادیر واقعی است. مقدار R^2 نزدیک به ۱ نشان‌دهنده یک مدل با دقت بسیار بالا است. یکی از مزایای اصلی استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در این پژوهش، قابلیت ارزیابی



شکل ۸- فلوجارت فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مدل‌های نیابتی.

$$F(x) = \sum_{i=1}^3 \omega_i \cdot |f_{i, pred}(x) - f_{i, target}| + \sum_{i=1}^3 \eta_i \quad (5)$$

که در این رابطه:

- x : بردار متغیرهای طراحی شامل ۴ پارامترهای هندسی (L_p, S_1, U_1, U_2) است.
- $f_{i, pred}$: فرکانس تشدید پیش‌بینی شده برای باند i -ام توسط مدل جنگل تصادفی است.
- $f_{i, target}$: فرکانس‌های هدف طراحی شامل ۱/۴۶، ۱/۱۷ و ۱/۷۶ تراهرتز می‌باشد.
- ω_i : ضریب وزنی برای هر باند فرکانسی است که در این مطالعه برای ایجاد اهمیت یکسان، برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

² Coefficient of Determination

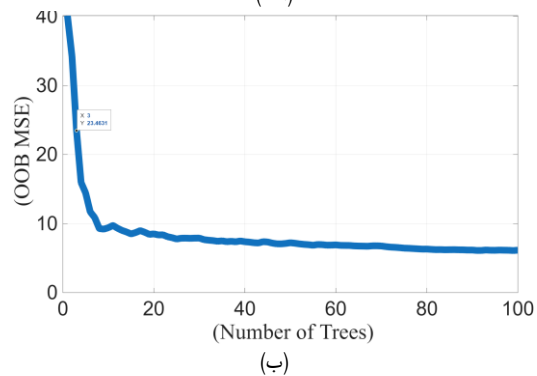
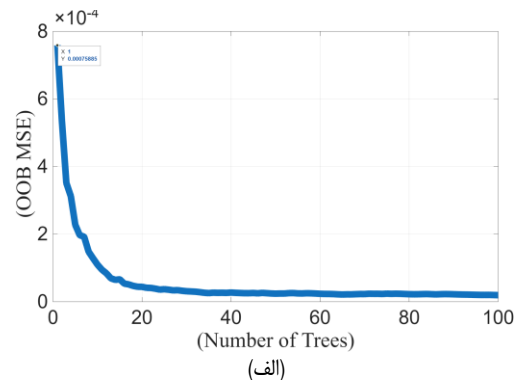
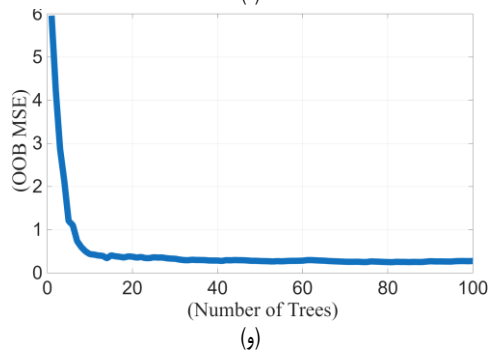
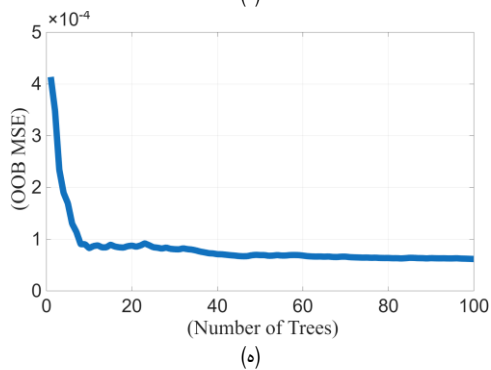
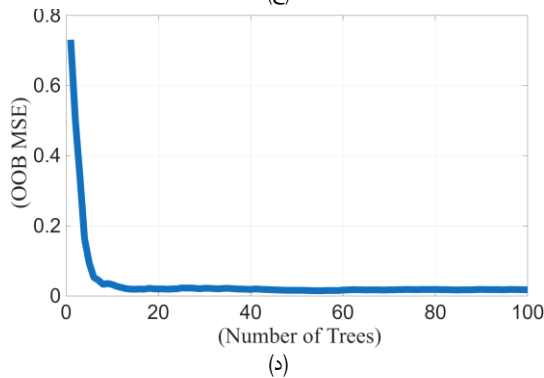
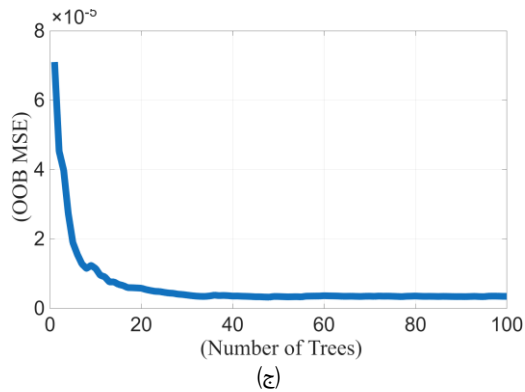
¹ Mean Squared Error

داخلی مدل با استفاده از خطای خارج از کیسه (OOB¹) است. در فرآیند آموزش، هر درخت تنها با بخشی از داده‌ها آموزش می‌بیند و نمونه‌هایی که در آموزش یک درخت خاص شرکت ندارند (نمونه‌های OOB)، برای ارزیابی دقت آن درخت به کار گرفته می‌شوند. میانگین خطای کل نمونه‌ها به عنوان خطای OOB مدل شناخته می‌شود و مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$MSE_{OOB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i^{OOB})^2, \quad (9)$$

در این رابطه، مانند رابطه (۷)، n تعداد کل نمونه‌ها، y_i مقدار واقعی شبیه‌سازی شده و \hat{y}_i^{OOB} میانگین پیش‌بینی‌های حاصل از درختانی است که نمونه i -ام در آموزش آن‌ها نقشی نداشته است. این معیار یک تخمین بدون سوگیری از عملکرد مدل بر روی داده‌های دیده نشده ارائه می‌دهد.

شکل ۹، نمودارهای خطای OOB MSE را برای هر شش مدل نیابتی ما بر حسب تعداد درخت‌های جنگل (از ۱ تا ۱۰۰) نشان می‌دهد.



شکل ۹- نمودارهای خطای OOB برای ارزیابی عملکرد شش مدل جنگل تصادفی آموزش دیده جهت پیش‌بینی. (الف): fC_1 ، (ب): $|S_{11}^1|$ ، (ج) fC_2 ، (د): $|S_{11}^2|$ ، (ه) fC_3 ، (و) $|S_{11}^3|$.

همانطور که در نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد درخت‌ها، خطای هر شش مدل به سرعت کاهش یافته و پس از حدود ۲۰ تا ۳۰ درخت، به یک مقدار کم و پایدار همگرا می‌شود. این همگرایی سریع و خطای نهایی پایین، دقت بسیار بالایی مدل‌های نیابتی ساخته

¹ Out-of-Bag

شده را برای پیش‌بینی پیچیده و غیرخطی عملکرد آنتن سه‌باند تأیید می‌کند.

۵-۲- مقایسه بار محاسباتی روش پیشنهادی با GA مستقیم

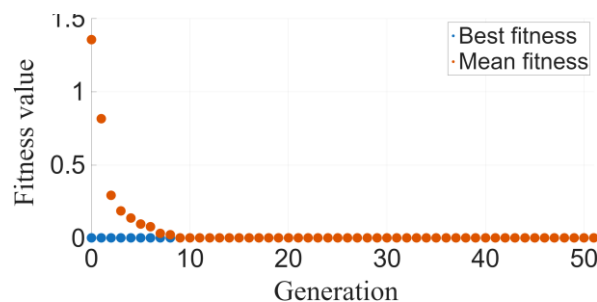
برای نشان دادن برتری محاسباتی روش پیشنهادی، یک مقایسه مفهومی با بهینه‌سازی مستقیم مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و شبیه‌ساز CST انجام شد. در حالت GA مستقیم، هر ارزیابی تابع هزینه مستلزم اجرای یک شبیه‌سازی الکترومغناطیسی کامل است که با توجه به زمان متوسط حدود ۷ دقیقه برای هر شبیه‌سازی، اجرای الگوریتم در مقیاس صدها ارزیابی، به ده‌ها ساعت زمان محاسباتی نیاز دارد. در مقابل، در روش پیشنهادی مبتنی بر مدل نیابتی، الگوریتم ژنتیک با استفاده از مدل جنگل تصادفی در زمانی از مرتبه چند ثانیه همگرا می‌شود و تنها یک شبیه‌سازی نهایی برای اعتبارسنجی نیاز است. این نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی کاهش چشمگیری در هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند، بدون آنکه دقت نهایی طراحی قربانی شود. مقایسه این دو در جدول زیر آمده است.

جدول ۱- مقایسه بار محاسباتی روش پیشنهادی با GA

مستقیم			
روش بهینه‌سازی	تعداد شبیه‌سازی CST	زمان تقریبی	دقت نهایی
GA مستقیم CST + GA + مدل	~۶۰۰	~۷۰ ساعت	بالا
نیابتی (پیشنهادی)	۲۴۰	~۲۸ ساعت	بالا

۵-۳- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

پس از اطمینان از دقت بالای مدل‌های نیابتی، از آن‌ها در حلقه بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. اهداف بهینه‌سازی، دستیابی به سه باند تشدید دقیق در فرکانس‌های هدف و همچنین حداقل کردن تلفات بازگشتی ($|S_{11}| < -10\text{ dB}$) در هر سه باند بود. فرآیند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است. این نمودار، بهترین مقدار تابع هزینه پیدا شده در هر نسل از الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک در طول فرآیند بهینه‌سازی.

همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مقدار تابع هزینه که نشان‌دهنده میزان انحراف عملکرد آنتن از اهداف مطلوب است، در نسل‌های اولیه به سرعت کاهش می‌یابد. الگوریتم پس از حدود ۱۰ نسل، به یک مقدار کم و پایدار همگرا می‌شود. این همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک با موفقیت توانسته است فضای طراحی را کاوش کرده و به یک راه‌حل بهینه (مجموعه‌ای از ابعاد هندسی) دست یابد که تابع هزینه تعریف شده را به حداقل می‌رساند.

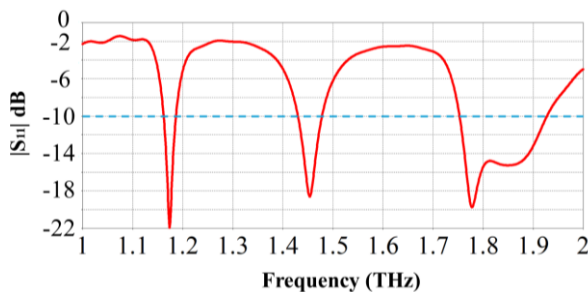
۵-۴- اعتبارسنجی نهایی

پس از اجرای فرآیند بهینه‌سازی GA، مجموعه‌ای از ابعاد هندسی به عنوان پاسخ بهینه ارائه داده می‌شود. این ابعاد، که تابع هزینه چند هدفه ما را به حداقل می‌رسانند، در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- مقادیر بهینه به دست آمده نهایی.

پارامتر	L_p	S_1	U_1	U_2
مقدار (μm)	۴۰/۹۸۹۴	۴۸/۲۶۸۶	۱۹/۰۶۸۱	۱۹/۰۶۴

برای اعتبارسنجی نهایی، آنتن نهایی معرفی شده در شکل ۵ با این ابعاد بهینه، در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی می‌گردد. این شبیه‌سازی تأییدی به عنوان قضاوت نهایی در مورد موفقیت آمیز بودن فرآیند بهینه‌سازی عمل می‌کند. نتیجه تلفات بازگشتی ساختار نهایی با ابعاد بیان شده در جدول ۱، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار تلفات بازگشتی آنتن نهایی شکل ۶ با ابعاد بیان شده در جدول ۱ به کمک نرم‌افزار CST.

همانطور که در نمودار شکل ۱۱ مشخص است، آنتن نهایی عملکرد سه بانده خوبی از خود نشان می‌دهد و دقیقاً به اهداف طراحی دست یافته است. تمامی فرکانس‌های تشدید در در فرکانس‌های هدف ۱/۱۷، ۱/۴۶، و ۱/۷۶ تراهرتز قرار دارند. به علاوه، عمق تشدید مربوطه در هر سه فرکانس بیان شده بهتر از ۱۰-دسی‌بل است. این نتایج که تطابق فوق‌العاده‌ای با اهداف اولیه طراحی دارند، موفقیت کامل رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر مدل نیابتی را اثبات می‌کند.

۵-۵ - مقایسه آنتن پیشنهادی با برخی از کارهای اخیر

مدل نیابتی ارائه شده است که امکان دستیابی دقیق به سه باند فرکانسی هدف را با هزینه محاسباتی بسیار کمتر فراهم می‌کند. این ویژگی، روش پیشنهادی را به گزینه‌ای مناسب برای طراحی آنتن‌های تراهرتزی هدفمند، به‌ویژه در کاربردهای حسگری چندطیفی، تبدیل می‌نماید.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، اگرچه مطالعات متعددی به طراحی آنتن‌های چندباند تراهرتزی پرداخته‌اند، اغلب این روش‌ها مبتنی بر طراحی دستی یا بهینه‌سازی مستقیم پرهزینه بوده‌اند. در مقابل، در این پژوهش، یک چارچوب بهینه‌سازی هوشمند مبتنی بر

جدول ۳- مقایسه آنتن پیشنهادی با برخی از کارهای اخیر در حوزه آنتن‌های تراهرتزی.

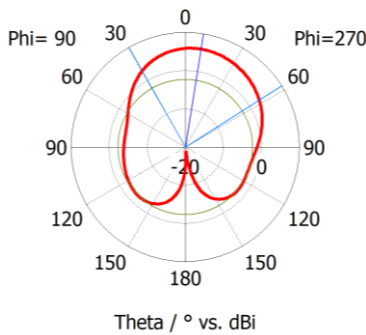
کاربرد	Surrogate-assisted optimization	روش طراحی/ بهینه‌سازی	فرکانس‌ها (THz)	تعداد باند	نوع آنتن	مرجع
ارتباطات	خیر	بهینه‌سازی پارامتریک	۰/۸۸ و ۰/۴۴	دو باند	پچ + سطح فرکانس گزین	[10]
حسگری	خیر	تنظیم‌پذیر	۲/۶۸ و ۱/۵۴	دو باند	آنتن تشدیدگر عایقی + گرافن	[11]
THz	خیر	طراحی کلاسیک	۸/۸۵ و ۵/۷۵، ۴/۱۵	سه باند	آنتن تشدیدگر عایقی	[13]
6G	خیر	GA مستقیم	۲/۳۷ و ۱/۱۴، ۰/۸۴	سه باند	MIMO	[14]
حسگری چندطیفی	بله	GA مبتنی بر مدل نیابتی	۱/۷۶ و ۱/۴۶، ۱/۱۷	سه باند	پچ ریزنوری	این مقاله

۵-۶ - تحلیل الگوهای تابشی

در این کاربردها معمولاً نیاز است که انرژی به صورت متمرکز تابش شود. الگوهای تشعشعی دوبعدی آنتن نهایی در دو صفحه اصلی (E-plane: صفحه xz یا $\varphi = 0$ و H-plane: صفحه yz یا $\varphi = 90$) و در سه فرکانس مرکزی هر باند (۱/۱۷، ۱/۴۶ و ۱/۷۶ تراهرتز) در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده‌اند.

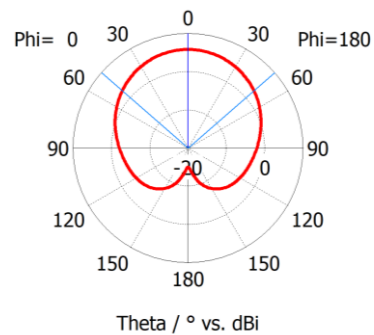
علاوه بر تلفات بازگشتی که در بخش قبل بررسی شد، به بررسی الگوی تابش آنتن نیز می‌پردازیم. این پارامتر برای اطمینان از مناسب بودن آنتن برای کاربرد هدف (حسگری و طیف‌سنجی) ضروری می‌باشد، زیرا

Farfield Directivity Abs (Phi=90)



(ب)

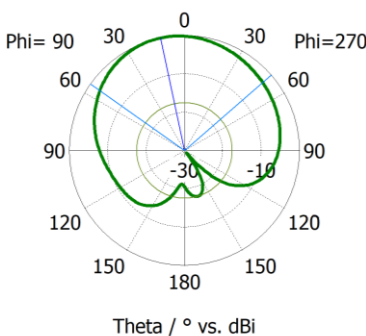
Farfield Directivity Abs (Phi=0)



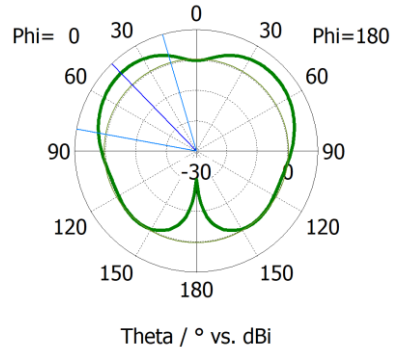
(الف)

شکل ۱۲- الگوهای تشعشعی آنتن بهینه شده نهایی در فرکانس کاری ۱/۱۷ تراهرتز و در صفحات: (الف) E-plane، (ب) H-plane.

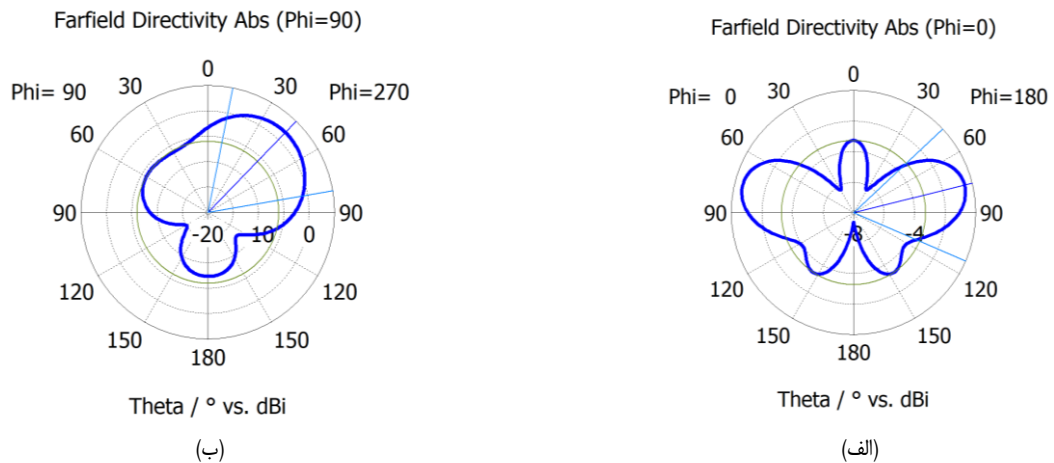
Farfield Directivity Abs (Phi=90)



Farfield Directivity Abs (Phi=0)



شکل ۱۳- الگوهای تشعشعی آنتن بهینه شده نهایی در فرکانس کاری ۱/۴۶ تراهرتز و در صفحات: (الف) E-plane ، (ب) H-plane.



شکل ۱۴- الگوهای تشعشعی آنتن بهینه شده نهایی در فرکانس کاری ۱/۷۶ تراهرتز و در صفحات: (الف) E-plane ، (ب) H-plane.

یک آنتن پیچ مستطیلی ساده به عنوان آنتن پایه آغاز گردید. سپس، طی یک فرآیند تکاملی دومرحله‌ای، با افزودن بریدگی‌های گوشه برای ایجاد آنتن دو بانده و یک شکاف U-شکل برای دستیابی به آنتن سه بانده، ساختار نهایی کاندید جهت بهینه‌سازی طراحی شد. با توجه به پیچیدگی هندسی آنتن نهایی و وجود بده-بستان غیرخطی بین پارامترهای طراحی متعدد، بهینه‌سازی دستی این ساختار برای رسیدن به سه فرکانس هدف دقیق، غیرممکن بود. برای غلبه بر این چالش، از یک روش بهینه‌سازی کارآمد مبتنی بر مدل نیابتی استفاده شد. در این روش، الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان یک مدل نیابتی سریع جهت پیش‌بینی رفتار آنتن آموزش داده شد و سپس در یک حلقه بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شد.

نتایج به دست آمده دو دستاورد کلیدی را نشان می‌دهد: اول، اثبات کارایی بالای روش شناسی بهینه‌سازی مبتنی بر مدل نیابتی در حل مسائل طراحی چند هدفه و غیرخطی در حوزه تراهرتز، که به طور قابل توجهی هزینه‌های محاسباتی و زمان طراحی را در مقایسه با بهینه‌سازی مستقیم کاهش می‌دهد. دوم، آنتن نهایی بهینه‌شده، عملکردی عالی در فرکانس‌های هدف نشان داد؛ به طوری که سه تشدید دقیق در فرکانس‌های ۱/۱۷، ۱/۴۶ و ۱/۷۶ تراهرتز با موفقیت حاصل شد. مقادیر تلفات بازگشتی در این فرکانس‌ها کمتر از حد تعیین شده ۱۰-دسی‌بل است که نشان‌دهنده تطبیق امپدانس بسیار مطلوب در هر سه بانده است. به علاوه، الگوهای تشعشعی آنتن نهایی نیز جهت‌داری مناسبی را در هر سه بانده فرکانسی برای کاربردهای حسگری نشان می‌دهد.

نوآوری اصلی این مقاله در ترکیب الگوریتم جنگل تصادفی با الگوریتم ژنتیک در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر مدل نیابتی برای طراحی آنتن سه بانده تراهرتزی است که نسبت به روش‌های پیشین

تحلیل نتایج الگوهای تشعشعی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- فرکانس ۱/۱۷ تراهرتز: مشاهده می‌شود که آنتن دارای یک الگوی تابش جهت‌دار با یک لوب واضح در جهت $\theta = 0$ است. سطح لوب‌های کناری پایین و نسبت تابش جلو به عقب بالا است. این جهت‌داری برای کاربردهای حسگری بسیار مطلوب است، زیرا به تمرکز حداکثری انرژی تراهرتز بر روی نمونه مورد آزمایش کمک می‌کند.
- فرکانس ۱/۴۶ تراهرتز: الگوی تابش در باند دوم نیز همچنان جهت‌داری خوب خود را حفظ کرده است. لوب اصلی همچنان در جهت مطلوب مرکز است و بهره بالایی را نشان می‌دهد.
- فرکانس ۱/۷۶ تراهرتز: در آخرین بانده فرکانسی، الگوی تابش همچنان جهت‌داری خود را حفظ کرده است، اگرچه ممکن است لوب‌های کناری کمی افزایش یافته باشند که این امر در فرکانس‌های بالاتر طبیعی است. با این حال، لوب اصلی همچنان بر الگوی تابش مسلط است.

این تحلیل نشان می‌دهد که آنتن بهینه‌شده، مشخصات تابشی پایداری را در هر سه بانده فرکانسی ارائه می‌دهد و انرژی را به خوبی در جهت مورد نظر متمرکز می‌کند، که این امر مناسب بودن آن را برای کاربردهای حسگری چندطیفی تأیید می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب جامع برای طراحی و بهینه‌سازی هوشمند یک آنتن ریزنواری سه بانده فشرده جهت کاربردهای حسگری چندطیفی در حوزه تراهرتز، ارائه شده است. فرآیند طراحی با معرفی

applications and future connectivity," *TELKOMNIKA*, 2025.

- [14] K. Aliqab, M. Alsharari, V. Sorathiya, and A. Armghan, "A numerical investigation of graphene-based hilbert-shaped multi-band MIMO antenna for the terahertz spectrum applications," *Sensors*, 2022.
- [15] S. Tripathi, Sundaram, R. M. Chadhar, R. Ranjan, and D. K. Tripathi, "Performance prediction of a two-port terahertz-based graphene-silicon-based tunable antenna with polarization and pattern diversity features using machine-learning algorithms," *Applied Optics*, vol. 64, no. 2, pp. 415-422, 2025.
- [16] S. B. Belhaouari, A. Mokaddem, D. Ziani, M. Belkheir, and M. Rouissat, "ML/GA-based performance optimization of PBG-enhanced THz microstrip patch antennas on PTFE-SWCNT," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 44111, Dec. 2025.
- [17] M. A. Haque, M. M. Arafat, I. Das, G. Alyami, M. Billah, N. S. S. Singh, H. A. Abdallah, and A. A. Ateya, "Predictive modelling and high-performance enhancement smart THz antennas for 6G applications using regression machine learning approaches," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 1-18, 2025.
- [18] Y. Jiang, G. Li, H. Ge, "Machine learning and application in terahertz technology: a review on achievements and future challenges," *IEEE Access*, 2022.
- [19] H. Huang, X. S. Yang, and B. Z. Wang, "Machine-learning-based generative optimization method and its application to an antenna decoupling design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023.
- [20] M. Boudjerda, "Design and optimization of miniaturized microstrip patch antennas using a genetic algorithm," *Electronics*, 2022.
- [21] W. En-Naghma, H. Halaq, and A. El Ougli, "Analysis, design, and optimization based on genetic algorithms of a highly efficient dual-band rectenna," *Results in Engineering*, 2024.
- [22] A. Dejen, J. Jayasinghe, M. Ridwan, and J. Anguera, "Synthesis of quadband mm-wave microstrip antenna using genetic algorithm for wireless application," *Technologies*, 2023.
- [23] M. A. Haque, "Machine learning-based technique for resonance and directivity prediction of UMTS LTE band quasi Yagi antenna," *Heliyon*, 2023.
- [24] R. Jain, V. V. Thakare, and P. K. Singhal, "Design and comparative analysis of THz antenna through machine learning for 6G connectivity," *IEEE Latin America Transactions*, 2024.
- [25] F. Mir, L. Kouhalvandi & L. Matekovits, "Deep neural learning based optimization for automated high performance antenna designs," *Scientific Reports*, 2022.

(مانند شبکه‌های عصبی) از دقت بالاتر و هزینه محاسباتی کمتری برخوردار است.

۵-مراجع

- [1] P. F. Taday, M. Pepper, and D. D. Arnone, "Selected applications of terahertz pulses in medicine and industry," *Applied Sciences*, 2022.
- [2] X. Fu, Y. Liu, Q. Chen, Y. Fu, and T. J. Cui, "Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances," *Frontiers in Physics*, 2022.
- [3] A. Praveena, VAS Ponnappalli, and G. Umamaheswari, "Terahertz antenna technology for detection of explosives and weapons: a concise review," *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*, 2022.
- [4] M. Gezimati and G. Singh, "Terahertz imaging and sensing for healthcare: current status and future perspectives," *IEEE Access*, 2023.
- [5] R. Pant and L. Malviya, "THz antennas design, developments, challenges, and applications: A review," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2023.
- [6] Q. Elalaouy, M. El Ghzaoui, and J. Foshi, "THz antennas: applications and challenges a review," *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*, 2024.
- [7] M. S. Ahammed, R. A. Ananta, J. J. Tiang, "A high-gain THz microstrip patch antenna designed for IoT and 6G communications with predicted efficiency using machine learning approaches," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2025.
- [8] M. E. Benlakehal, A. Hocini, D. Khedrouche, "Design and analysis of novel microstrip patch antenna array based on photonic crystal in THz," *Optical and Quantum Electronics*, 2022.
- [9] M. N. Hamza, M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, "Precision multiband terahertz metamaterial biosensor with targeted spectral selectivity for early detection," *IEEE Sensors Journal*, 2025.
- [10] Y. Amraoui, I. Halkhams, R. El Alami, "Terahertz dual-band antenna design with improved performances using FSS-based metasurface concept for wireless applications," *Scientific African*, 2024.
- [11] S. Fakhte and M. M. Taskhiri, "Dual-band terahertz dielectric resonator antenna with graphene loading," *Optical and Quantum Electronics*, 2022.
- [12] S. Ahmad, O. Benkhadda, A. Akram, and M. Saih, "Design and analysis of a tri-band dielectric resonator antenna for terahertz applications," *IEEE Access*, 2023.
- [13] J. H. Nirob, K. H. Nahin, M. A. Haque, "Optimized tri-band MIMO antenna design for 6G terahertz

- [26] P. Mahouti, M. A. Belen, N. Çalık, and S. Koziel, "Computationally efficient surrogate-assisted design of pyramidal-shaped 3D reflectarray antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022.
- [27] Y. Jiao, Q. Zhu, R. Ni, and Q. S. Cheng, "A multisurrogate-assisted optimization framework for SSPP-based mm wave array antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023.
- [28] Z. Wang, J. Qin, Z. Hu, J. He, and D. Tang, "Multi-objective antenna design based on BP neural network surrogate model," *Applied Sciences*, 2022.
- [29] M. Zafarkhah, E. Zareian-Jahromi, and R. Basiri, "Broadband terahertz antenna design with defected ground structure and parasitic elements using a feedforward neural network," *J. of Modern Researches on Electronic Defence Systems*, Mar. 2025.
- [30] K. Fu, X. Cai, B. Yuan, Y. Yang, and X. Yao, "An efficient surrogate assisted particle swarm optimization for antenna synthesis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022.
- [31] O. Engin, M. G. Baydoğan, and A. C. Durgun, "Gradient-boosted decision tree optimizer for antenna optimization," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 309-325, 2025.
- [32] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., John Wiley & Sons, 2016.