

طراحی آنتن تراهرتزی پهن باند با ساختار زمین ناقص و المان‌های پارازیتی به کمک شبکه عصبی پیشرو

محمدرضا ظفرخواه^۱، احسان زارعیان جهرمی^{۲*}، راحله بصیری^۳

۱. دانشجوی دکتری تخصصی مخابرات میدان، دانشگاه صنعتی شیراز، فارس، ایران.

۲ و ۳. دانشیار، مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، فارس، ایران

چکیده

در این مقاله، یک آنتن تراهرتزی پهن باند جدید با ساختار مبتنی بر زمین ناقص و المان‌های پارازیتی معرفی شده است. ابعاد ساختاری آنتن معرفی شده از طریق آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از روش انتشار رو به جلو و الگوریتم بهینه‌سازی لونیگ-مارکواریت با ۱۰ نورون، بدست آمده است. هدف اصلی این طراحی، بهبود پهنای باند تلفات بازگشتی است. این هدف با استفاده همزمان از ساختار زمین ناقص و المان‌های پارازیتی حاصل شده است. ساختار آنتن شامل یک زیرلایه با ثابت دی‌الکتریک ۹/۴ و تانژانت تلفاتی ۰/۰۰۰۰۲ است که در ابعادی برابر با 100×100 میکرومتر مربع طراحی شده است. پیکربندی آنتن بر اساس شبکه عصبی پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از ۱۴۳ نمونه آموزشی به دست آمده است. در نهایت، پهنای باند عملکردی حاصل شده به میزان ۴۱٪ بهبود یافته است. بعلاوه، الگوی‌های تشعشی آنتن در محدوده فرکانس کاری بررسی شده اند که رفتار مطلوبی را نشان می دهند.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی پیشرو، آنتن، تراهرتز، ساختار زمین ناقص.

Broadband Terahertz Antenna Design with Defected Ground Structure and Parasitic Elements Using a Feedforward Neural Network

Mohammadreza Zafarkhah¹, Ehsan Zareian-Jahromi^{2*}, Raheleh Basiri³

1. Ph. D. Student in Telecommunications, Shiraz University of Technology, Fars, Iran
2,3. Associate Prof., Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Fars, Iran.

Abstract

In this paper, a novel wideband terahertz antenna with an imperfect ground structure and parasitic elements has been proposed. The optimized antenna geometrical parameters are obtained using an artificial neural network which employs forward feedback propagation along with the Levenberg-Marquardt optimization algorithm including 10 neurons. The objective of this design is to increase the obtained return loss bandwidth of designed antenna. This demanded objective is obtained using imperfect ground structure and parasitic elements together. The antenna structure features a substrate with a dielectric constant of 9.4 and a loss tangent of 0.00002, designed within dimensions of 100 by 100 square micrometers. The antenna configuration is derived from the neural network implemented in MATLAB program using 143 training samples. As a result, the obtained performance bandwidth is 41% more than that of ordinary terahertz microstrip antenna. Furthermore, the obtained radiation patterns are investigated over operational frequency band showing a suitable performance.

Key words: Feedforward Neural Network, Antenna, Terahertz, Defected Ground Structure.

تاریخ دریافت:

۲۹ دی ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۲۰ اسفند ماه ۱۴۰۳

فناوری ترانزیتور در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از مهندسين حوزه مخابرات و ارتباطات را به خود جلب کرده است. دلیل این امر، کاربردهای گسترده آن در حوزه‌های مختلف از جمله ارتباطات راه دور، تصویربرداری صنعتی، طیف‌سنجی و تشخیص‌های پزشکی می‌باشد. فناوری ترانزیتور افقی امیدوارکننده برای شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم آینده است، چراکه محدوده فرکانسی ترانزیتور که معمولاً بین ۱۰۰ گیگاهرتز تا ۱۰ ترانزیتور تعریف می‌شود، می‌تواند انتقال سیگنال با پهنای باند فوق‌العاده عریض را با سرعت داده بالا، مخصوصاً برای تکنولوژی نسل 6G و فراتر از آن تسهیل کند. بدین ترتیب، معایبی مانند ظرفیت محدود و کمبود طیف در سیستم‌های بی‌سیم فعلی مانند 4G-LTE و 5G برطرف می‌گردد [۱]. آنتن‌های میکروستریپ به دلیل اندازه کوچک و سهولت در ادغام با مدارهای الکترونیکی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲]. به علاوه، یکی از اجزای حیاتی در توسعه سیستم‌های ترانزیتور، آنتن‌هایی است که قادر به کوپل کردن مؤثر امواج الکترومغناطیسی فضای آزاد با دستگاه‌های ترانزیتور باشند. آنتن‌های پیچ میکرواستریپ به طور گسترده برای ادوات دارای فناوری بلوتوث و وای‌فای مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های مطلوب این آنتن‌ها عبارتند از بهره بالا، الگوهای تابش مستقیم، چند بانده شدن، قطبش دوگانه، قابلیت ساخت آسان، وزن سبک، حجم کم، هزینه ساخت کم و سهولت ادغام با دستگاه‌های الکترونیکی [۳]. آنتن‌های پیچ میکرواستریپ به دلیل محدودیت‌های ذاتی مواد و محدودیت‌های ساختاری، دچار کارایی پایین، پهنای باند محدود، و تلفات زیاد در باند فرکانسی ترانزیتور هستند. در نتیجه، تحقیقات بر روی طرح‌های نوآورانه در طراحی این آنتن‌ها جهت حل مشکلات بیان شده متمرکز شده است [۴]. در ادامه، محدودیت‌های موجود در ساخت و توسعه آنتن‌های ترانزیتور، تشریح می‌گردند. در آینده و جهت دستیابی به سرعت‌های انتقال داده بالا، از فناوری ترانزیتور با فرکانس‌های بین ۰/۱ تا ۱۰ ترانزیتور استفاده خواهد شد. آنتن‌های ترانزیتور با جهت‌دهی بالا می‌توانند به عنوان فرستنده و گیرنده برای جبران تلفات توان در مسیر انتشاری استفاده شوند [۵]. یکی از چالش‌های اصلی در ساخت آنتن‌های ترانزیتور، انتخاب و استفاده از مواد مناسب است. مواد سنتی مانند فلزات ممکن است عملکرد مطلوبی در باند فرکانسی ترانزیتور نداشته باشند، چرا که نمی‌توانند تلفات کم و رسانایی بالا را در این فرکانس‌ها نشان دهند. علاوه بر این، مواد دی‌الکتریک مورد استفاده در ساختار آنتن اغلب در برابر امواج ترانزیتور شفاف نیستند، بنابراین منجر به افزایش تلفات جذب می‌شود که می‌تواند عملکرد دستگاه را مختل کند [۶]. طراحی آنتن‌های ترانزیتور به دلیل طول موج‌های کوچک که معمولاً بین ۳ mm تا ۳۰ μm است، ذاتاً پیچیده است. ادغام آنتن‌های ترانزیتور با سیستم‌های الکترونیکی و فوتونیک موجود، چالش مهم دیگری را باعث می‌شود. ادغام مؤثر اغلب به تکنیک‌های ساخت پیشرفته نیاز دارد

که می‌تواند فرآیندی گران و زمانبر باشد [۷ و ۸]. از طرف دیگر، اندازه‌گیری دقیق عملکرد آنتن‌های ترانزیتور به دلیل عدم وجود تکنیک‌های اندازه‌گیری در این فرکانس‌ها، با چالش‌هایی همراه است. روش‌های سنتی مانند اندازه‌گیری‌های میدان دور، ممکن است مستقیماً برای محدوده فرکانسی ترانزیتور قابل استفاده نباشند. اگر چه تکنیک‌های نوظهور مانند تصویربرداری میدان نزدیک و نمونه‌برداری الکترواپتیک در حال توسعه هستند، اما به تجهیزات و تخصص پیچیده‌ای نیاز دارند [۹ و ۱۰]. یک رویکرد امیدوارکننده برای بهبود پاسخ آنتن ترانزیتور، شامل ترکیب ساختارهای زمین معیوب (DGS¹) و عناصر پارازیتی در پیکربندی آنتن است. DGS به اصلاح مهندسی شده صفحه زمین در آنتن اشاره دارد که می‌تواند منجر به بهبودهای قابل توجهی در ویژگی‌های عملیاتی آن مانند بهره، پهنای باند، و الگوهای تابش شود [۱۱ و ۱۲]. مفهوم DGS شامل ایجاد تغییرات هندسی یا نقص‌های خاص در صفحه زمین است که می‌تواند خواص الکترومغناطیسی آنتن‌ها را دستکاری کند. این تغییرات می‌تواند حالت‌های رزونانسی ایجاد کند و بر جریان‌های سطحی تأثیر بگذارد و در نهایت، منجر به افزایش راندمان تابش و کاهش تابش پشتی شود. علاوه بر این، استفاده از DGS می‌تواند کوچک‌سازی آنتن را تسهیل کند و آن‌ها را برای ادغام با سیستم‌های فشرده ترانزیتور، مناسب‌تر کند [۱۳ و ۱۴]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این ساختارها می‌توانند بهبودهایی در پارامترهای مختلف ایجاد کنند. به عنوان مثال، Cheng و همکاران نشان دادند که چگونه یک ساختار DGS می‌تواند پهنای باند آنتن میکرواستریپ ترانزیتور را تا ۵۰ درصد افزایش دهد و در عین حال، ویژگی‌های بهره را نیز بهبود بخشد [۱۴]. به طور مشابه، Zhang و همکاران یک ساختار DGS معرفی کردند که منجر به کاهش قابل توجهی در تریویج متقابل بین آنتن‌های مجاور شد [۱۵]. ساختارهای پارازیتی که به عناصر اضافی در نزدیکی تشعشع‌کننده اصلی اشاره می‌کنند، راه دیگری را برای بهبود عملکرد آنتن ترانزیتور ارائه می‌دهند. این ساختارها می‌توانند به عنوان بازتابنده یا هدایت‌کننده عمل کنند و با تأثیر بر توزیع میدان الکترومغناطیسی، به افزایش بهره و جهت‌دهی آنتن کمک کنند. با طراحی هوشمندانه این عناصر پارازیتی، می‌توان به پیشرفت‌های قابل توجهی در ویژگی‌های آنتن، از جمله افزایش پهنای باند و بازده کلی تشعشع آن دست یافت [۱۶]. هدف از این مقاله، طراحی یک آنتن ترانزیتور پهن باند با استفاده از ساختار DGS و همچنین عناصر پارازیتی است. جهت کاهش زمان و پیچیدگی‌های محاسباتی، از شبکه عصبی یا به اختصار (ANN²) جهت طراحی آنتن مورد نظر بهره می‌گیریم. شبکه‌های عصبی با الهام از عملکرد مغز انسان، پتانسیل فوق‌العاده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله تشخیص الگو، پردازش تصویر، و بهینه‌سازی نشان داده‌اند. با استفاده از این تکنیک‌ها در طراحی و بهینه‌سازی آنتن‌های ترانزیتور، می‌توان به اهدافی مانند بهبود پهنای باند و تلفات بازگشتی دست یافت. بر اساس مطالب ذکر شده، بخش‌های

¹ Defected Ground Structure

² Artificial Neural Network

مختلف مقاله به شرح ذیل است. در بخش دوم، تئوری روش طراحی به کمک شبکه عصبی بیان می‌شود و کاربردهای آن در طراحی آنتن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم، جزئیات طراحی آنتن تراهرتز پیشنهادی بیان می‌شود که شامل طراحی آنتن مینا و تکمیل آن با ساختار DGS و عناصر پارازیتی است. در بخش چهارم، شیوه استفاده از شبکه عصبی برای هوشمند سازی طراحی به منظور رسیدن به یک آنتن پهن‌بند، بیان و نتایج شبیه‌سازی بیان می‌شود. در نهایت، مقاله در بخش پنجم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود.

۲- استفاده از شبکه عصبی برای شبیه‌سازی آنتن تراهرتز

همانگونه که در قسمت مقدمه گفته شد، به منظور کاهش دشواری‌های طراحی و زمان شبیه‌سازی، می‌توان از قابلیت‌های طراحی به کمک شبکه عصبی بهره گرفت. ادغام شبکه‌های عصبی در فرآیند طراحی چندین مزیت را ارائه می‌دهد [۱۷]. در مرحله اول، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر پارامترهای آنتن را با استفاده از حجم وسیعی از داده‌های شبیه‌سازی شده یا اندازه‌گیری شده، فراهم می‌کند. شبکه‌های عصبی می‌توانند رابطه پیچیده بین هندسه آنتن، ویژگی‌های زیرلایه، و معیارهای عملکرد مطلوب را بیاموزند و بهینه‌سازی طرح‌های آنتن را برای کاربردهای خاص ممکن سازند. محاسبات انجام شده توسط ANN در زمان اجرای کمتر و با پیچیدگی‌های محاسباتی ریاضی کاهش یافته انجام می‌شود [۱۷] و [۱۸]. در مرحله دوم، استفاده از شبکه‌های عصبی زمان و تلاش مورد نیاز طراحی را کاهش می‌دهد، زیرا نیاز به فرآیندهای بهینه‌سازی تکراری طولانی و پرهزینه محاسباتی را از بین می‌برد. شبکه‌های عصبی با استفاده از توانایی خود در یادگیری و تعمیم داده‌ها، راه‌حل‌های کارآمد و سریعی را برای مسائل پیچیده طراحی ارائه می‌کنند و از رویکرد سنتی آزمون و خطا اجتناب می‌کنند [۱۸]. در پیاده‌سازی یک آنتن میکرواستریپ با شبکه‌های عصبی، در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی مانند ابعاد آنتن، خواص زیرلایه، محل تغذیه و شکل بسیار مهم است. این پارامترها به طور قابل توجهی بر عملکرد آنتن از جمله الگوی تابش، بهره، تطبیق امپدانس، و پهنای باند اثر می‌گذارند [۱۹]. چندین مطالعه تحقیقاتی، کاربرد شبکه‌های عصبی را در طراحی آنتن پچ میکرواستریپ با موفقیت نشان داده‌اند. به عنوان مثال، مطالعه‌ای توسط Mitra و همکاران صورت گرفته که یک شبکه عصبی پیش‌خور را برای بهینه‌سازی ابعاد پچ آنتن میکرواستریپ جهت دستیابی به عملکرد چند بانده پیاده‌سازی کرده است [۲۰]. علاوه بر این، Ghosh از ترکیبی از الگوریتم پس انتشار و شبکه‌های عصبی پیش‌خور برای طراحی یک آنتن میکرواستریپ با قطبش دایره‌ای استفاده کرد. پارامترهای هندسی بهینه توسط شبکه عصبی تولید شده که منجر به بهبود نسبت محوری، پهنای باند، و بهره شد [۱۹]. آنتن‌های میکرواستریپ در سال‌های اخیر به دلیل اندازه کوچک، وزن کم، و سهولت ادغام با بردهای مدار چاپی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با این حال، بهینه‌سازی پارامترهای

طراحی برای دستیابی به ویژگی‌های عملیاتی مطلوب می‌تواند بسیار چالش برانگیز باشد. در این زمینه، الگوریتم Levenberg Marquardt به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تنظیم دقیق پارامترهای آنتن میکرواستریپ جهت برآورده کردن اهداف مد نظر، مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این روش، می‌توان پیچیدگی‌های ذاتی بهینه‌سازی چند پارامتری را به طور موثر کاهش داد. همانطور که تقاضا برای آنتن‌های با کارایی بالا همچنان در حال افزایش است، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی پیشرفته مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند منجر به طراحی‌های خلاقانه و کارآمد شود. این الگوریتم، یک روش تکراری است که برای حل مسائلی مانند حداقل مربعات غیر خطی استفاده می‌شود. به عنوان نمونه، روش‌های نزول گرادیان و الگوریتم گاوس نیوتن ترکیب می‌شود تا مجموع خطاهای مجذور بین مقادیر محاسبه‌شده و مطلوب کاهش یابد. با توجه به مدلی که با پارامترهای x مشخص می‌شود، هدف به حداقل رساندن تابع هزینه زیر است:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m r_i^2(x), \quad (1)$$

که $r_i(x)$ مربوط به تفاوت بین پاسخ‌های مشاهده شده و مدل‌سازی شده است. گام به روز رسانی برای پارامترها توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

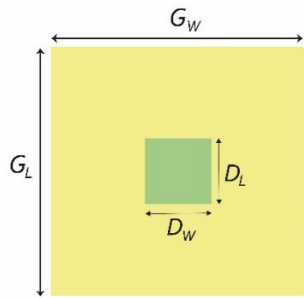
$$x_{k+1} = x_k - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T r. \quad (2)$$

لازم به ذکر است که با مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با معیارهای عملکرد هدف، باقیمانده‌های $r_i(x)$ محاسبه می‌شود. ماتریس ژاکوبین $J(x)$ توسط مشتقات جزئی باقیمانده‌ها نسبت به پارامترها محاسبه می‌شود. فرآیند به روز رسانی به طور مکرر اعمال می‌شود و ضریب میرایی μ بگونه‌ای تنظیم می‌شود تا سرعت همگرایی و پایداری متعادل گردد.

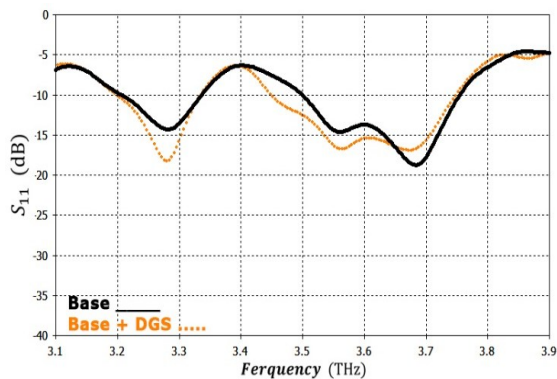
۳- طراحی آنتن تراهرتز پیشنهادی

در این بخش، ابتدا یک آنتن تراهرتز پچ میکرواستریپ به عنوان آنتن مینا مطابق با شکل (۱) و به کمک نرم‌افزار CST شبیه‌سازی می‌شود. ابعاد طراحی شده جهت آنتن مورد نظر در جدول (۱) بیان شده است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، فلز طلا عملکرد خوبی از نظر پهنای باند، بهره، و کارایی در باند فرکانسی تراهرتز از خود نشان می‌دهد [۲۱]. به همین علت برای طراحی آنتن مینای اولیه، از فلز طلا با ضخامت $1\mu\text{m}$ استفاده می‌شود. انتخاب جنس زیر لایه با توجه به محدوده فرکانس کار (فرکانس‌های تراهرتز)، اهمیت بسیاری دارد. به عبارتی مقدار گذردهی الکتریکی و تانژانت تلفات ماده‌ی زیر لایه، بسیار با اهمیت خواهد بود. بنابراین باید سراغ موادی رفت که میزان گذردهی الکتریکی مطلوب و تانژانت تلفات کمی داشته باشند. جنس زیر لایه که با رنگ سبز در شکل (۱) مشخص شده است، یاقوت کبود (Al_2O_3) با ضخامت $10\mu\text{m}$ ، گذردهی الکتریکی $9/4$ ، و تانژانت

(۴) از فرکانس ۳/۲ الی ۳/۳۴ تراهرتز و از ۳/۴۵ الی ۳/۷۵ تراهرتز است. از مقایسه نتایج آنتن مینا با آنتن دارای ساختار DGS، شاهد افزایش پهنای باند در باند دوم فرکانسی هستیم.

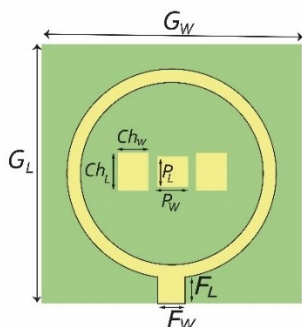


شکل ۳- ساختار نمای پشت آنتن پچ میکرواستریپ و پارامترهای مورد استفاده برای ایجاد ساختار زمین ناقص



شکل ۴- مقایسه میزان تلفات بازگشتی آنتن تراهرتز شبیه سازی شده مینا (خط) با آنتن دارای ساختار DGS (نقطه چین)

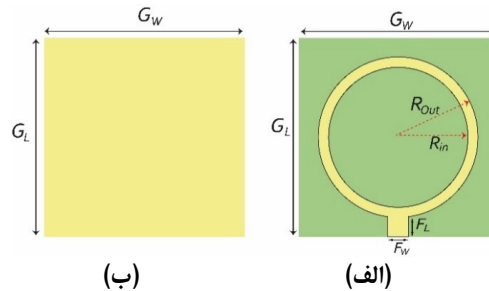
در گام بعدی، ساختاری مستطیل شکل و از جنس طلا با همان ضخامت $1 \mu\text{m}$ به عنوان عنصر پارازیتی با پارامترهای $Ch_L = 9 \mu\text{m}$ ، $P_L = 9 \mu\text{m}$ ، $P_W = 10.23 \mu\text{m}$ و $Ch_W = 9 \mu\text{m}$ در وسط ساختار آنتن مینا اضافه می‌گردد (شکل ۵). لازم به ذکر است که زمین این ساختار آنتنی به صورت زمین کامل مطابق با شکل (۱)-ب است.



شکل ۵: ساختار پارازیتی افزوده شده به آنتن تراهرتز بدون DGS

آنتن باز طراحی شده در شکل (۵)، شبیه‌سازی می‌گردد، که نتیجه حاصله را می‌توان در شکل (۶) (الف) مشاهده نمود. افزودن ساختار پارازیتی می‌تواند تلفات بازگشتی را به میزان قابل توجهی در فرکانس‌های رزونانس اول و دوم، کاهش دهد و همچنین، افزایش پهنای باند را

تلفات 0.0002% می‌باشد. یا قوت کبود، گزینه ای بسیار مناسب برای استفاده در آنتن‌های تراهرتز است، زیرا دارای تانژانت تلفات کم و استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی بالا است [۲۲].

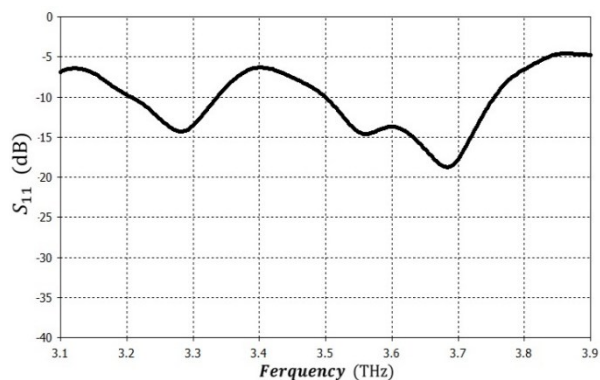


شکل ۱- ساختار (الف) نمای بالا و (ب) پشت آنتن مینا

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده جهت طراحی آنتن مینا در شکل (۱)

Parameter	Value (μm)
G_W	100
G_L	100
F_L	10/7
F_W	10
R_{in}	35
R_{Out}	40

بعد از طراحی ساختار آنتن مینا در برنامه CST، میزان تلفات بازگشتی مطابق با شکل (۲) خواهد بود. یا در نظر گرفتن مینای -10 dB ، پهنای باند حاصله از ۳/۲ الی ۳/۳۴ تراهرتز و ۳/۵ الی ۳/۷۵ تراهرتز است.



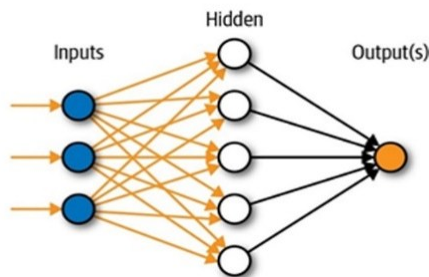
شکل ۲- میزان تلفات بازگشتی شبیه سازی شده آنتن مینا در شکل (۱)

در گام بعدی، قسمتی را به عنوان ساختار DGS همانند شکل (۳) در پشت آنتن ایجاد می‌نمائیم. لازم به ذکر است که در این بخش همانند بخش قبلی از پارامترهای آنتن مینا استفاده می‌شود و صرفاً پارامترهای $D_L = 7 \mu\text{m}$ و $D_W = 9 \mu\text{m}$ برای ایجاد مقدار دهی می‌شوند. سپس همانند بخش قبلی، آنتن را شبیه‌سازی کرده تا میزان تلفات بازگشتی بدست آید. نتیجه این شبیه‌سازی را در شکل (۴) می‌توان مشاهده نمود. از شکل (۴) می‌توان نتیجه گیری کرد که با اضافه کردن ساختار DGS، میزان تلفات بازگشتی در فرکانس های رزونانس اول و دوم، کاهش پیدا کرده است. پهنای باند در شکل

به همراه دارد. پهنای باند بدست آمده در شکل (۶) از فرکانس ۳/۲ الی ۳/۳۴ تراهرتز و از ۳/۴۲ الی ۳/۷۵ تراهرتز، می‌باشد. از مقایسه پهنای باند با آنتن مینا یا آنتن دارای ساختار DGS، شاهد افزایش مجدد پهنای باند در باند دوم فرکانسی هستیم. لازم به ذکر است که اگر چه هم‌چنان دارای ساختاری دو بانده هستیم، اما استفاده از عناصر پارازیتی ما را به ایجاد یک آنتن تراهرتزی پهن باند نزدیک‌تر کرده است. در ادامه در شکل (۶) (ب)، الگوهای تشعشی آنتن‌ها در حالت‌های مینا، به همراه ساختار DGS، و به همراه ساختار پارازیتی در اولین فرکانس رزونانس مربوطه نشان داده شده‌اند. نتایج حاصله، عدم تغییر قابل توجه در الگوی تشعشی را نشان می‌دهد.

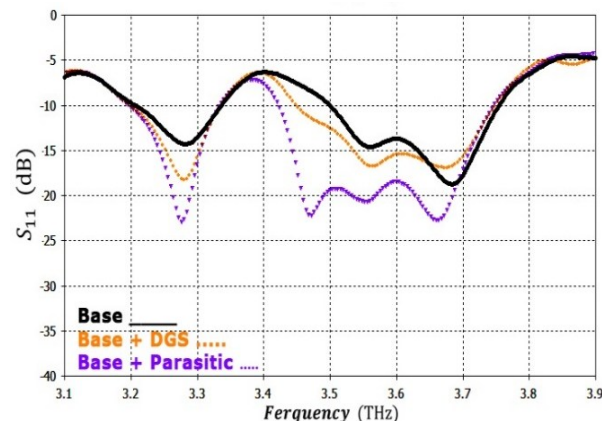
۳-۱- شبکه عصبی پیشرو و آموزش آن

شبکه عصبی به عنوان یک الگوریتم هوشمند عمل می‌کند که طراحی آنتن را با استفاده از قابلیت یادگیری خود، عملی می‌کند. شماتیکی از یک معماری پرسپترون چند لایه در شکل (۷) نشان داده شده است.

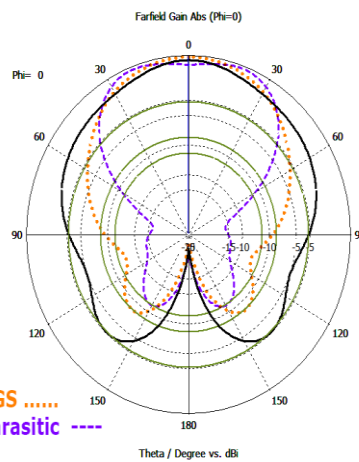


شکل ۷- ساختار شبکه عصبی مصنوعی

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، شبکه عصبی مد نظر از سه لایه اصلی تشکیل شده است: لایه ورودی، لایه پنهان، و لایه خروجی. هر لایه از نورون‌هایی به نام گره تشکیل شده است که گره‌های لایه ورودی به گره‌های لایه پنهان متصل می‌شوند و به طور مشابه، گره‌های لایه پنهان به گره‌های لایه خروجی متصل می‌گردند. الگوریتم یادگیری برای آموزش شبکه عصبی با تنظیم وزن‌ها جهت به حداقل رساندن خطا بین خروجی ANN و نتایج شبیه‌سازی شده CST به عنوان نمونه‌های آموزشی استفاده می‌کند [۱۱]. در این مقاله، ۸ پارامتر ورودی، ۱۰ نورون پنهان، و ۸ خروجی برای شبکه عصبی استفاده شده است. سایر پارامترهای آنتن همانند ضخامت زیر لایه و ضخامت لایه طلا روی آنتن یا پشت آن ثابت هستند. همچنین لازم به ذکر است که اگر تعداد نورون‌های عصبی افزایش یابد، مدت زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار Matlab افزایش پیدا کرده اما دقت نتایج حاصله نیز بیشتر می‌شود که با توجه به امکانات موجود، تعداد ۱۰ نورون انتخاب شده است. برای به دست آوردن یک مدل ANN کارآمد، پارامترهای آنتن و ابعاد آنها با کمک CST تنظیم می‌شوند. ANN رابطه غیر خطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را مدل می‌کند. پارامترهای خروجی عبارتند از میزان تلفات بازگشتی و فرکانس‌های رزونانس آنتن. برای مدلسازی طراحی آنتن از یک شبکه عصبی مصنوعی با انتشار بازخورد پیشرو همراه با الگوریتم بهینه‌سازی Levenberg-Marquardt استفاده شده است. این الگوریتم به دلیل توانایی یادگیری سریع و ویژگی‌های همگرایی خوب آن توصیه می‌شود [۱۸]. نرم‌افزار CST برای ۱۴۳ نمونه شبیه‌سازی با



(الف)



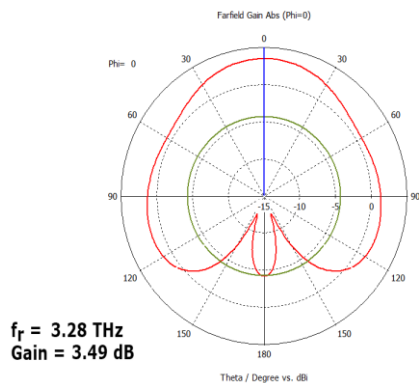
(ب)

شکل ۶- مقایسه (الف) تلفات بازگشتی در محدوده فرکانس کاری و (ب) الگوهای تشعشی در اولین فرکانس رزونانس مرتبط با حالت‌های مینا، با ساختار DGS، و با ساختار پارازیتی

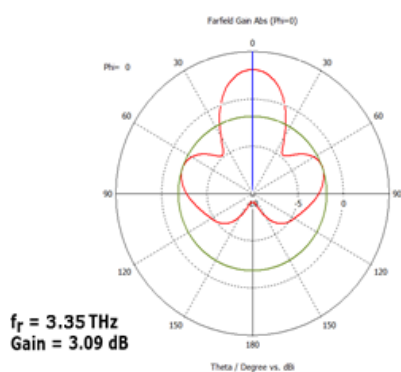
حال در گام بعدی، بصورت همزمان ساختار DGS با ساختار پارازیتی ترکیب می‌شود تا بتوان به هدف ساختار پهن باند دست یافت. جهت حل مشکل بار محاسباتی بسیار زیاد جهت طراحی ساختار نهایی، به سراغ کمک گرفتن از شبکه عصبی می‌رویم. هشت پارامتر اصلی وجود خواهد داشت که می‌توانیم آنها را تغییر بدهیم و نتایج گوناگونی را بدست آوریم. این هشت پارامتر شامل P_w , D_L , D_w

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده جهت طراحی آنتن نهایی

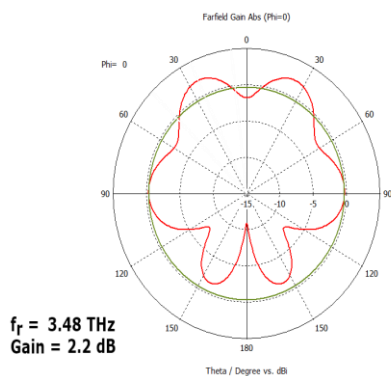
Parameter	Value (μm)
D_w	9
D_L	7
F_L	10/7
F_w	10
Ch_w	16
Ch_l	6/5
P_w	10/23
P_L	9



(الف)



(ب)

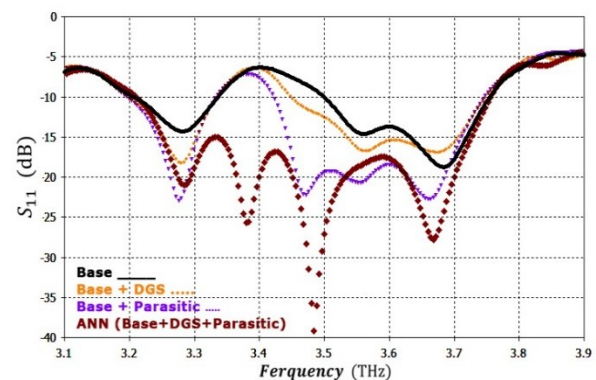


(ج)

مقادیر متمایز پارامترهای ورودی استفاده می‌شود که جهت آموزش ANN بکار می‌رود.

۲-۳- آنتن پهن باند طراحی شده به کمک شبکه عصبی

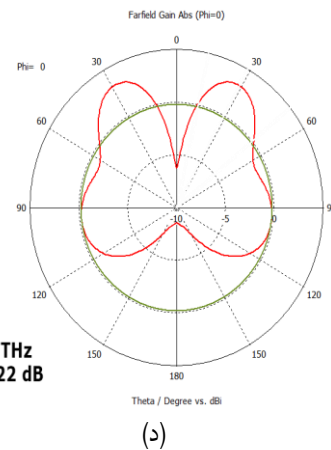
بعد از ۱۴۳ بار اجرای شبیه‌سازی آنتن در برنامه CST با استفاده از تغییر پارامترهای بیان شده، هشت داده برای هر بار شبیه‌سازی به عنوان خروجی از برنامه CST استخراج می‌گردد. این داده‌ها شامل چهار فرکانس رزونانس و چهار مقدار $|S_{11}|$ متناظر می‌باشد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Matlab و ساخت یک شبکه عصبی پیشرو، جدول اطلاعاتی شامل فرکانس‌های رزونانس و مقادیر $|S_{11}|$ آن‌ها بارگزاری شده و شبکه عصبی، آموزش داده می‌شود. هدف بر این است که بتوانیم در هر چهار فرکانس رزونانس، کمترین میزان تلفات بازگشتی را داشته باشیم. پس از پایان اجرای شبکه عصبی، مقادیر لازم برای قرار دادن پارامترهای آنتن نهایی طراحی شده در نرم‌افزار CST به دست می‌آید. نتایج میدانی متناظر با ساختار نهایی بدست آمده در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- تلفات بازگشتی آنتن نهایی طراحی شده به کمک شبکه عصبی پیشرو

همانطور که از شکل (۸) مشخص است، توانسته‌ایم با استفاده از ترکیب ساختار DGS و همچنین ساختار پارازیتی، میزان قابل توجهی از تلفات بازگشتی را کاهش دهیم و شاهد افزایش پهنای باند از فرکانس $3/2$ الی $3/75$ تراهرتز باشیم. از مقایسه بازه پهنای باند آنتن مینا با آنتن نهایی طراحی شده به کمک شبکه عصبی پیشرو، شاهد افزایش پهنای باند ۴۱ درصدی خواهیم بود. در شکل (۹) نیز الگوی تشعشی آنتن در چهار فرکانس رزونانس $3/48$ ، $3/35$ ، $3/28$ و $3/66$ تراهرتز نمایش داده شده است. رفتار الگوی تشعشی آنتن نهایی، عملکردی مطلوب را در بازه فرکانس کاری نشان می‌دهد و تنها در آخرین فرکانس رزونانس، مقداری چرخش پرتو از حالت پهلوتاب مشاهده می‌شود. مقادیر نهایی هشت پارامتر آنتن طراحی شده توسط شبکه عصبی پیشرو، در جدول (۲) بیان گشته است.

- [6] Y. He, Y. Chen, L. Zhang, S. W. Wong, and Z. N. Chen, "An overview of terahertz antennas," *China Commun.*, vol. 17, no. 7, pp. 124–165, 2020.
- [7] A. Abina, U. Puc, and A. Zidanšek, "Challenges and opportunities of terahertz technology in construction and demolition waste management," *J. Environ. Manage.*, vol. 315, p. 115118, 2022.
- [8] R. Xu *et al.*, "A review of broadband low-cost and high-gain low-terahertz antennas for wireless communications applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57615–57629, 2020.
- [9] A. Boulogeorgos, E. N. Papatiriou, and A. Alexiou, "Analytical performance assessment of THz wireless systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11436–11453, 2019.
- [10] H. Sareddeen, M. S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, "An overview of signal processing techniques for terahertz communications," *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 10, pp. 1628–1665, 2021. DOI: 10.1109/JPROC.2021.3100811.
- [11] B. Mishra, R. K. Verma, N. Yashwanth, and R. K. Singh, "A review on microstrip patch antenna parameters of different geometry and bandwidth enhancement techniques," *Int. J. Microwave Wireless Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 652–673, 2022. DOI: 10.1017/S1759078721001148.
- [12] F. Ahmed, *Near-Field Metallic Metasurfaces for High-Performance Antenna Systems*, Doctoral dissertation, University of Technology Sydney (Australia), 2022.
- [13] B. Kumar *et al.*, "Design and development of compact microstrip patch antenna with DGS for wireless applications," in *2024 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symp. (WAMS)*, 2024, pp. 1–4.
- [14] M. Cholavendan and V. Rajeshkumar, "Design of compact metamaterial inspired dual band antenna with defective ground structure for sub 6-GHz communication," in *2021 IEEE Indian Conf. Antennas Propag. (InCAP)*, 2021, pp. 220–223.
- [15] F. Babaeian and B. Virdee, "A comprehensive survey on various decoupling mechanisms with focus on metamaterial and metasurface principles applicable for SAR and MIMO systems," *Opt. Eng.*, vol. 56, no. 1, p. 010901, 2020.
- [16] G. Saraereh, O. A., L. Al-Tarawneh, A. Ali, and A. M. Al Hadidi, "Design and analysis of a novel antenna for THz wireless communication," *Intell. Autom. Soft Comput.*, vol. 31, no. 1, pp. 607–619, 2022.
- [17] J. Singh, A. P. Singh, and T. S. Kamal, "Design of circular microstrip antenna using artificial neural networks," in *Proc. World Congr. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 6–9, 2011.
- [18] V. V. Thakare and P. Singhal, "Microstrip antenna design using artificial neural networks," *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 76–86, 2010.
- [19] N. Chhaule *et al.*, "A comprehensive review on conventional and machine learning-assisted design of 5G microstrip patch antenna," *Electronics*, vol. 13, no. 19, p. 3819, 2024.
- [20] G. Mitra, A. Chakraborty, and M. Mitra, "Designing a multi-band microstrip patch antenna using feed forward neural network model," *IETE Tech. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 172–180, 2017.
- [21] P. K. Singh *et al.*, "Design and simulation of microstrip antenna for terahertz applications," in *Generation, Detection and Processing of Terahertz Signals*, vol. 794, Singapore: Springer, 2022, pp. 263–283.
- [22] J. A. Hejase, P. R. Paladhi, and P. P. Chahal, "Terahertz characterization of dielectric substrates for component design and nondestructive evaluation of packages," *IEEE Trans. Components, Packag. Manufact. Technol.*, vol. 1, no. 11, pp. 1685–1694, Nov. 2011.



(د)

شکل ۹- الف) الگوی تشعشعی آنتن نهایی در زاویه $\phi = 0^\circ$ و فرکانس الف) ۳/۲۸ تراهرتز، ب) ۳/۳۵ تراهرتز، ج) ۳/۴۸ تراهرتز، د) ۳/۶۶ تراهرتز.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا یک آنتن میکرواستریپ تراهرتز به عنوان آنتن مینا در نظر گرفته شده است. در ادامه به کمک افزودن ساختار زمین معیوب و همچنین استفاده از عناصر پارازیتی، به دنبال ارائه ساختاری جدید با هدف افزایش پهنای باند هستیم. سپس، با استفاده از شبکه عصبی پشیرو با ۸ پارامتر ورودی و ۱۰ نورون عصبی، سرعت محاسبات لازم جهت طراحی آنتن نهایی را افزایش می‌دهیم. لازم به ذکر است که شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده با انتشار بازخورد پیشرو همراه با الگوریتم بهینه سازی Levenberg-Marquardt است. این الگوریتم به دلیل طولانی‌بودن یادگیری سریع و ویژگی‌های همگرایی خوب آن توصیه می‌شود. آنتن حاصله از شبیه سازی ها، دارای ۴۱٪ پهنای باند بیشتر نسبت به پهنای باند آنتن اولیه خواهد بود. همچنین میزان تلفات بازگشتی در ۴ فرکانس رزونانس مد نظر، به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است.

۵- مراجع

- [1] A. Malekijavan and M. Aslinezhad, "A novel feed network for microstrip patch antenna at THz frequency band," *JOEDS*, vol. 2, no. 5, pp. 40-44, Abbrev. Feb. 2024.
- [2] Virnave, S. "Design of Antenna for Multipurpose Wireless Communication: Microstrip Antenna". *International Journal of Science and Research*, 13(5), 869–873, 2024.
- [3] P. Akila, P. Akshaya, L. Aparna, and J. M. S. Mol, "Design and analysis of microstrip patch antenna using alumina and paper substrate for WiFi application," *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 5, no. 4, pp. 3287–3290, 2018.
- [4] Y. Deng *et al.*, "Terahertz antennas: A review," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 8, pp. 4219–4231, 2017.
- [5] Kumar P, Sivakumar V, Rao V, George CT, Awadhiya B, Huchegowda YB, Nanjappa Y. "A defected ground structure based ultra-compact wider bandwidth terahertz multiple-input multiple-output antenna for emerging communication systems". *Heliyon*. 2024 Sep 15;10(17).