

استفاده از نانو کامپوزیت های کربنی در طراحی جاذب های الکترومغناطیسی پهن باند^۱

محمد رضا کرمی*^۲، صفدر حبیبی^۳، بابک ژاله^۴

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۰۲/۰۴

تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

چکیده

در حالت عادی ترکیبات کربن دارای جذب الکتریکی بالایی در باند فرکانسی مایکروویو می باشند. بمنظور افزایش جذب مغناطیسی این ترکیبات، نانو ذرات ناخالصی مانند فریت ها، سنداست ها و ذرات فلزی به آنها افزوده می شود. در این مقاله با بکارگیری نانو کامپوزیت های کربنی یک ساختار جاذب الکترومغناطیسی معرفی شده است. این جاذب بصورت چندلایه و در محدوده باند X مایکروویو ($12/4\text{GHz} - 17/2$) با استفاده از خواص الکترومغناطیسی نانو کامپوزیت های کربنی معرفی شده در تحقیقات اخیر، طراحی شده است. در این طراحی محاسبه مقادیر

^۱ شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/jap.2017.9445.1036

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا؛ mohammadreza.karami56@gmail.com

^۳ استادیار گروه فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا

^۴ استاد گروه فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا

جذب براساس تئوری خط انتقال (TLM) انجام شده است. همچنین بهینه‌سازی عملکرد جاذب معرفی شده با هدف دستیابی به بیشترین پهنای باند جذبی، با بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته محلی (MLPSO) صورت گرفته است. این جاذب با ضخامت $3/3\text{mm}$ در حالت تابش عمودی موج الکترومغناطیسی، دارای حداقل تلفات بازگشتی $11/8\text{ dB}$ - (معادل ۹۴ درصد جذب) و حداکثر جذب 42 dB - در محدوده فرکانسی X می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نانو کامپوزیت‌های کربنی، جاذب الکترومغناطیسی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته محلی (MLPSO)، روش تحلیلی خط انتقالی (TLM).

مقدمه

امروزه با گسترش کاربردهای امواج الکترومغناطیسی، استفاده از جاذب‌های الکترومغناطیسی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. از جاذب‌های الکترومغناطیسی در کاربردهای مختلفی مانند: رادار گریزی در صنایع نظامی، جذب امواج مضر در گوشی‌های موبایل، جذب امواج تداخلی در سیستم‌های مخابراتی همجوار، جذب امواج تداخلی ایجاد شده در مدارها و بردهای الکترونیکی و جذب امواج مضر در تجهیزات پزشکی استفاده می‌شود. طراحی جاذب‌ها با روش‌های مختلفی مانند چندلایه کردن هدفمند جاذب‌ها، استفاده از سطوح انتخابگر فرکانسی و بکارگیری محیط پلازما انجام می‌شود [۱]. جاذب‌های چندلایه به دلیل کم‌هزینه بودن و داشتن دامنه وسیع کاربردی، یکی از متداولترین این روش‌ها می‌باشد. یک جاذب خوب باید دارای جذب بالا، وزن کم و میزان پهنای باند جذبی مناسب باشد. برای رسیدن به جذب بالا، جاذب باید دو ویژگی اصلی داشته باشد. این ویژگی‌ها عبارتند از: ۱- ایجاد تطبیق امپدانس بین محیط تابش با محیط جاذب، که باعث می‌شود کمترین بازتاب از سطح بیرونی جاذب به وجود آید و قسمت اعظم موج تابشی وارد جاذب شود. ۲- دستیابی به بیشترین خواص جذبی در ساختار جاذب، که موجب می‌شود توان موج هنگام عبور از جاذب به سرعت کاهش یابد و به

صورت گرما در جاذب تلف شود. تلفات بازگشتی و امیدانس کل جاذب چند لایه از تئوری خط انتقال^۱ (TLM) محاسبه می شود [۲]. برای اینکه یک جاذب جذب بالایی داشته باشد، باید مولفه های الکتریکی و مغناطیسی موج ورودی بطور همزمان تضعیف یا جذب شوند. مواد دی الکتریک معمولی توانایی جذب میدان الکتریکی را دارند اما به دلیل مغناطیسی نبودن، تضعیف میدان مغناطیسی را به خوبی انجام نمی دهند. برای رفع این مشکل در مواد دی الکتریک مانند: کربن ها، رزین ها، اپوکسی ها و گرافن ها، ترکیبات ناخالصی مانند: ذرات فلزی، سنداست ها، کربنیل های آهن، فریت ها و ذرات نیکل افزوده می شود تا میزان جذب الکترو مغناطیسی آنها افزایش یابد. در این ترکیب ها درصد ناخالصی و اندازه ذرات ناخالصی، در تغییر خواص الکترومغناطیسی مواد بسیار اثر گذار است [۳و۴]. دانشمندان با ایجاد تغییر در خصوصیات دی الکتریک و مغناطیسی کامپوزیت ها به دنبال دستیابی به جاذب های الکترومغناطیسی با کیفیت بالاتر می باشند. خصوصیات دی الکتریک ماده بر حسب نفوذپذیری الکتریکی^۲ آن و خصوصیات مغناطیسی آن بر حسب نفوذپذیری مغناطیسی^۳ آن به ترتیب با روابط ۱ و ۲ بیان می شود. هر دو مشخصه شامل قسمت های حقیقی و موهومی هستند و بصورت اعداد مختلط نوشته می شوند. هر دو مولفه در میزان جذب و تطبیق امپدانس نقش تعیین کننده ای دارند.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

ترکیبات کربنی به دلیل داشتن ضریب دی الکتریک بالا یکی از بهترین ترکیب ها برای تهیه جاذب ها می باشند. امروزه با گسترش علم نانو، امکان ساخت و طراحی کامپوزیت های کربنی یا گرافنی در این زمینه فراهم شده است. در برخی از تحقیقات پس از ساختن نانو کامپوزیت های کربنی جدید ضرایب الکترومغناطیسی آنها اندازه گیری شده و میزان جذب آنها محاسبه شده است [۵]. این کامپوزیت ها معمولاً دارای وزن کم و استحکام بالا و جذب نسبتاً مناسبی هستند. اما معمولاً پهنای باند جذبی کمی دارند. برای رفع این مشکل

¹ transmission line method

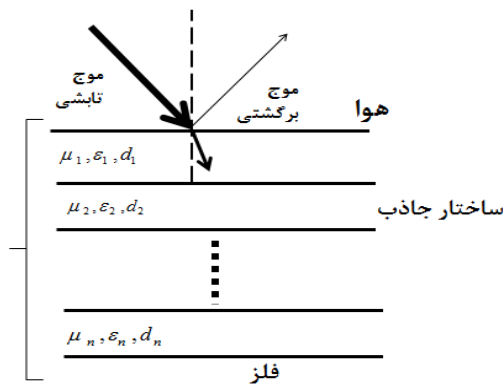
² Permittivity

³ Permeability

می‌توان از روش ساختار جاذب چند لایه بهره برد. با قرار دادن چندین ترکیب کامپوزیتی در لایه‌های مختلف علاوه بر افزایش میزان جذب، پهنای باند جذبی را نیز بطور چشمگیری بهبود داده می‌شود. در طراحی جاذب چند لایه پارامترهای طراحی شامل تعداد لایه‌ها، ضخامت هر لایه، تعداد مواد موجود برای استفاده در هر لایه و تغییر گام به گام ضرایب الکترومغناطیسی مواد با فرکانس می‌باشند. تغییر در این پارامترها جایگشت‌هایی را ایجاد می‌کند و تعداد حالت‌های ممکن بسیار زیاد خواهد شد. در نتیجه پیدا کردن بهترین حالت بصورت آزمایش و خطا یا دستی عملاً غیر ممکن است و باید با روش‌های بهینه‌یابی غیر خطی یا چند هدفه انجام شود. از متداول‌ترین این روش‌ها می‌توان به NSGA-II^۱ و MLPSO^۲ اشاره کرد. در این تحقیق با استفاده از ضرایب الکترومغناطیسی ۱۰ ماده نانو کامپوزیتی کربنی ارائه شده در مقالات دیگر یک جاذب ۴ لایه با ضخامت ۳/۳ mm و پهنای باند جذبی ۱۱/۸ dB- در محدوده فرکانسی X مایکروویو طراحی شده است.

اصول طراحی و بهینه سازی جاذب چند لایه

ساختار یک جاذب چند لایه را می‌توان مطابق شکل ۱ نشان داد. برای محاسبه امپدانس ساختار یک جاذب آنرا بر روی سطح فلز که دارای امپدانس صفر در محدوده مایکروویو است، قرار می‌دهند.



شکل ۱. ساختار یک جاذب چند لایه

^۱ Modified local best particle swarm optimization

^۲ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

تلفات بازگشتی ساختار جاذب، با روابط بازگشتی ۳ تا ۵ از سطح فلز با امپدانس صفر شروع شده تا محاسبه امپدانس کل لایه‌ها ادامه می‌یابد. مقدار تلفات بازگشتی بستگی به پارامترهای ۱- ترتیب لایه‌ها ۲- ضخامت لایه‌ها ۳- نوع مواد و ضریب گذردهی الکتریکی لایه‌ها دارد [۶]. با توجه به دامنه تغییرات پارامترهای قابل تنظیم در طراحی و همچنین منحصر به فرد بودن مقدار تلفات بازگشتی در فرکانس‌های مختلف، لذا در طراحی ساختار جاذب چند لایه، تعداد بسیار زیادی تابع چند هدفه ممکن خواهد بود. بهینه‌یابی چنین توابع غیر خطی چند هدفه بطور متداول با روش‌های بهینه‌سازی جمعیتی مانند: ازدحام ذرات بهبودیافته^۱ (PSO)، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) و الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب مرتبه دوم (NSGA-II) انجام می‌شود [۶].

$$\Gamma^{TE} = ((\eta_N \cos\theta - \eta_0 \cos\theta_N) + (\eta_N \cos\theta + \eta_0 \cos\theta_N)\Gamma_N^{-j2k_N d_N \cos\theta}) / ((\eta_N \cos\theta + \cos\theta_N) + (\eta_N \cos\theta - \eta_0 \cos\theta_N)\Gamma_N^{-j2k_N d_N \cos\theta}) \quad (۳)$$

$$\Gamma^{TM} = ((\eta_N \cos\theta - \eta_0 \cos\theta) + (\eta_N \cos\theta_N + \eta_0 \cos\theta)\Gamma_N^{-j2k_N d_N \cos\theta}) / ((\eta_N \cos\theta_N + \eta_0 \cos\theta) + (\eta_N \cos\theta_N - \eta_0 \cos\theta)\Gamma_N^{-j2k_N d_N \cos\theta}) \quad (۴)$$

$$R^{TE/TM} = 20 \log_{10} |\Gamma^{TE/TM}| \quad (۵)$$

بهینه‌یابی چنین توابع غیرخطی چند هدفه بطور متداول با روش‌های بهینه‌سازی جمعیتی مانند: ازدحام ذرات بهبودیافته (PSO)، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب مرتبه دوم (NSGA-II) انجام می‌شود [۶]. تعداد لایه‌ها مجاز ساختار و ضریب گذردهی الکتریکی $(\epsilon_n(f) = \epsilon'_n(f) - j\epsilon''_n(f))$ و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی $(\mu_n(f) = \mu'_n(f) - j\mu''_n(f))$ مواد موجود به عنوان ورودی اولیه به نرم‌افزار داده می‌شود و چیدمان هوشمندانه ساختار با توجه به تابع هدف و قیدهای طراحی به نرم‌افزار سپرده می‌شود.

^۱ particle swarm optimization

الگوریتم تراکم جمعیتی بهبود یافته محلی MLPSO یکی از نسخه‌های ارتقاء یافته PSO است. در این روش تمام حالت‌های ممکن بصورت فضای حالت در نظر گرفته می‌شود که هر حالت یک نقطه خواهد بود. برای بهینه‌یابی از کل فضای موجود به تصادف چند مجموعه با تعداد محدودی عضو انتخاب می‌شود. سپس بر اساس تابع هدف مسئله در هر مجموعه بهترین عضو به عنوان بهترین منطقه‌ای در یک فایل ذخیره می‌شود. در ادامه بهترین‌های منطقه‌ای با هم مقایسه می‌شوند تا بهترین کل پیدا شده مشخص شود و این مقدار نیز در یک فایل ذخیره می‌گردد. برای جستجوی بعدی، مکان مجموعه‌های جدید با توجه به مکان مجموعه‌های قبلی و فاصله این مکان‌ها با بهترین محلی و بهترین کل مطابق روابط ۶ و ۷ تشکیل می‌شود. در این مکان‌های جدید به تصادف تعدادی عضو تشکیل داده می‌شود و با استفاده از تابع هدف بهترین‌های کل و منطقه‌ای مجدداً محاسبه می‌شوند. اگر بهترین منطقه‌ای و کل جدید نسبت به حالت قبل بهتر باشند جایگزین حالت قبلی می‌شوند. با تکرار این روند مناطق جستجوی جدید به سمت بهترین‌های محلی و کل متمرکز شده و پس از چندین بار تکرار مجموعه‌ها در جهت گیرانداختن بهترین حالت متمرکز می‌شوند [۷ و ۸].

$$x_i(d) = x_{i-1}(d) + v_i(d) \quad (6)$$

$$(7)$$

$$v_i(d) = \omega * v_{i-1}(d) + c_1 * rand(p_{best}(d) - x_{i-1}(d)) + c_2 * rand(g_{best}(d) - x_{i-1}(d))$$

در معادلات ۶ و ۷، $x_i(d)$ و $v_i(d)$ مکان و سرعت ذره i ام در دیمانسیون d هستند و $rand$ مولد اعداد تصادفی یکسانی بین [۰، ۱] است. c_1 و c_1 ثابت‌های مثبتی هستند که شتاب ثابت نامیده می‌شوند. رابطه ۶ مکان جدید را با توجه به مکان قبل و با سرعت حرکت $v_i(d)$ تولید می‌کند. در رابطه ۷ سرعت حرکت ذره یا گروه محاسبه می‌شود، در سمت راست این تساوی عبارت اول تاثیر جابجایی مکان گروه یا ذره در مرحله قبل است، عبارت دوم اثر بهترین منطقه‌ای در مقدار جابجایی گروه یا ذره را تولید می‌کند. عبارت سوم اثر بهترین پاسخ جمعی در مقدار جابجایی گروه یا ذره را تعیین می‌کند [۷]. این تکرارها تا تحقق شرط پایان حلقه ادامه می‌یابد.

طراحی جاذب

از آنجایی که ضریب دی الکتریک کربن بالا است می تواند ماده مناسبی جهت تضعیف میدان الکتریکی باشد. اما چون ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آن پایین است نمی تواند جاذب مناسبی برای امواج باشد. برای غلبه بر این ضعف ذرات ناخالصی به ترکیبات کربن افزوده می شود. کامپوزیت های کربنی ایجاد شده مواد مناسبی برای ساخت جاذب های مغناطیسی خواهند بود. اما مشکل اصلی این جاذب ها پهنای باند جذبی کم است. در این تحقیق برای رفع این مشکل از روش جاذب های چند لایه استفاده شده است. برای این منظور از خواص الکترو مغناطیسی ۱۰ نانو کامپوزیت کربن پایه ارائه شده در مقالات دیگر به عنوان اطلاعات ورودی اولیه استفاده شده است [۹-۱۲]. نام و شماره گذاری این مواد در جدول ۱ آورده شده است.

برای انجام طراحی تابع هدف نوشته شده و قیده های طراحی اعمال گردیده است. سپس بهینه یابی بهترین حالت ممکن به روش بهینه سازی MLPSO سپرده شده است. در این طراحی هدف رسیدن به بیشترین متوسط جذب در بیشترین پهنای باند جذبی با کمترین ضخامت در نظر گرفته شده است. تابع هدف مورد نظر بصورت معادله (۸) تعیین شده است. جمله اول این معادله در برگیرنده متوسط جذب در تمامی گام های فرکانس است. از آنجایی که برای یک جاذب راداری داشتن جذب ۲۰ dB- و میزان جذب بیشتر از این مقدار یک حالت مطلوب محسوب می شود، با جمله دوم به نزدیکی میزان جذب به ۲۰ dB- ارزش دهی شده است به منظور اینکه جاذب پهن باند شود. جمله سوم تاثیر کمترین ضخامت را بر آورده می کند. همچنین در این روابط، N شماره هر لایه، I شماره گام فرکانس و J شماره گام های زاویه ای است. طراحی جاذب با استفاده از تئوری TLM و بهینه سازی آن با بکارگیری روش MLPSO انجام شده است.

$$C(f_i, \theta_j, d_N) = \min [p_1 + p_2 + p_3] \quad (8)$$

$$p_1 = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M R^{TE}(f_i, \theta_j) + R^{TM}(f_i, \theta_j)}{2KM} \quad (9)$$

$$p_2 = H \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M C^{TE}(f_i, \theta_j) + C^{TM}(f_i, \theta_j)}{2KM} \quad (10)$$

۶۰ / استفاده از نانو کامپوزیت‌های کربنی در طراحی جاذب‌های الکترومغناطیسی پهن‌بند

$$C^{TE/TM}(f_i, \theta_j) = \begin{cases} R^{TE/TM}(f_i, \theta_j) - 20 & R^{TE/TM}(f_i, \theta_j) < -10 \\ 0 & R^{TE/TM}(f_i, \theta_j) > -10 \end{cases} \quad (11)$$

$$p_3 = G \sum_{N=1}^n d_N \quad (12)$$

جدول ۱. شماره گذاری و نام ۱۰ نانو کامپوزیت کربنی استفاده شده در طراحی جاذب الکترومغناطیسی چند لایه در محدوده فرکانسی، اعداد مورد استفاده بر اساس نمودار ارائه شده در مقالات معتبر در گام‌های

فرکانسی می‌باشند $\{ f_i | f_i = 8.2, 8.4, 8.6, \dots, 12.2, 12.4 \text{ GHz} \}$

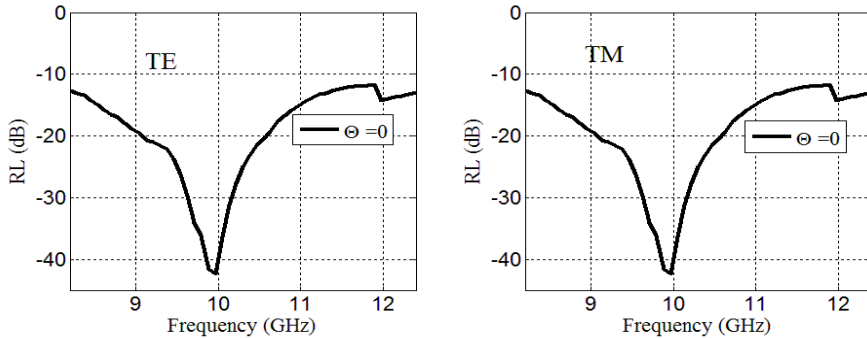
شماره	فرمول اختصاری نانو کامپوزیت	$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$	$\mu = \mu' - j\mu''$
1	Paint produced with polyaniline and carbonyl iron[۹]	{5.31-j1.32, 5.29-j1.32, ...}	{1.15-j-0.05, 1.15-j-0.05, ...}
2	graphene/paraffin composite[۱۰]	{8.30-j6.10, 8.2-j5.98, ...}	{0.99-j-0.01, 0.98-j-0.01, ...}
3	G-CdS/paraffin composite[۱۰]	{6.20-j2.81, 6.15-j2.80, ...}	{0.92-j-0.02, 0.93-j0.025, ...}
4	La(NO ₃) ₃ -ACNTs[۱۱]	{5.90-j2.25, 5.83-j2.30, ...}	{1.26-j0.075, 1.25-j0.075, ...}
5	ACNTs[۱۱]	{5.45-j0.49, 5.45-j0.49, ...}	{1.13-j0.07, 1.13-j0.068, ...}
6	MWCNTs[۱۱]	{8.10-j1.20, 8.08-j1.19, ...}	{1.13-j-0.04, 1.132-j-0.02, ...}
7	pp/5%pp-g-MA(L)/1.0MWNTs/20%Fe[۱۲]	{3.95-j0.26, 3.90-j0.027, ...}	{1.00-j0.00, 1.00-j0.01, ...}
8	pp/5%pp-g-MA(s)/1.0MWNTs/20%Fe[۱۲]	{4.24-j0.25, 4.23-j0.20, ...}	{1.00-j0.08, 1-j0.085, ...}
9	pp/5%pp-g-MA(s)/1.0MWNTs[۱۲]	{3.26-j0.35, 3.24-j0.37, ...}	{1.00-j0.00, 1.00-j0.00, ...}
10	pp/5%pp-g-MA(s)/20%Fe[۱۲]	{4.89-j0.50, 4.88-j0.51, ...}	{1.078-j0.08, 1.079-j0.0, ...}

مشخصات جاذب معرفی شده در جدول ۲ ارائه شده است. میزان جذب جاذب معرفی شده در تابش عمودی مطابق شکل ۲ می‌باشد. همانطور که در نمودار شکل ۲ دیده می‌شود کمترین میزان جذب این جاذب در فرکانس ۱۱/۹ GHz برابر ۱۱/۸ dB- است که تقریباً معادل ۹۴ درصد موج تابشی است.

جدول ۲. پارامترهای ساختار جاذب نانو کامپوزیتی ۴ لایه بهبود یافته به روش MLPSO

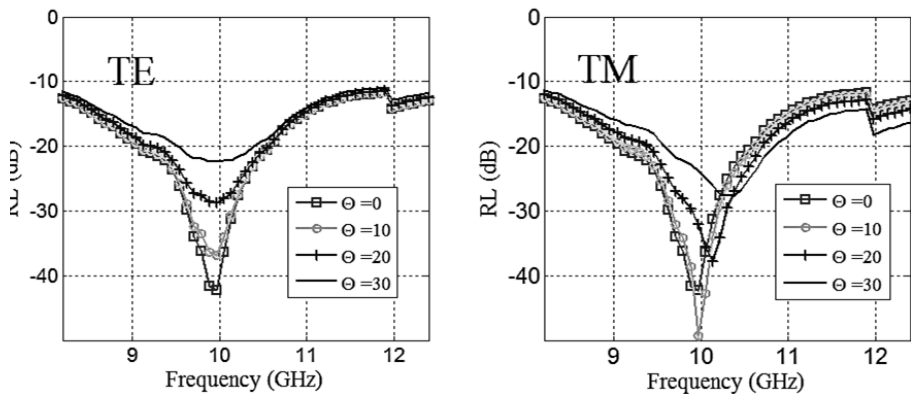
شماره لایه	شماره ماده در جدول ۲	ضخامت لایه (mm)
لایه ۱	۱۰	۰/۵
لایه ۲	۸	۰/۶
لایه ۳	۲	۱/۲
لایه ۴	۴	۱
فلز	ضخامت کل ساختار جاذب	۳/۳

در بقیه محدوده فرکانسی از این مقدار بیشتر است. از جمله اینکه میزان جذب آن در فرکانس ۹ GHz تا ۱۰/۵ GHz به بیش از ۲۰ dB- نیز می‌رسد. همانطور که از روابط نیز انتظار داشتیم در تابش عمود میزان جذب در پلاریزیشن‌های TE و TM یکسان است.



شکل ۲. میزان جذب ساختار طراحی شده در تابش عمودی

در شکل ۳ میزان تلفات بازگشتی جذب در زاویه‌های تابشی مختلف رسم شده است. همانطور که در نمودارهای شکل ۳ نیز دیده می‌شود در این جذب با وجود تغییر در میزان جذب، پهنای باند جذبی آن همچنان حفظ شده است.



شکل ۳. میزان جذب ساختار طراحی شده در تابش‌های مایل

عملکرد میزان جذب این جذب با چند نمونه از مواد جدول ۱ مقایسه شده است و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد میزان جذب و پهنای باند جذبی در جذب طراحی شده نسبت به مواد مورد استفاده به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

جدول ۳. مقایسه عملکرد جاذب‌های الکترومغناطیسی نانو کامپوزیتی

در محدوده X ماکروویو GHz ۸/۲-۱۲/۴

نوع جاذب	ضخامت mm	پهنای باند با جذب بیشتر از -۱۱/۸ dB	حداکثر جذب در محدوده X	حداقل جذب در محدوده X
جاذب معرفی شده	۳/۳	۸/۲-۱۲/۴ GHz	-۴۲ dB	-۱۱/۸ dB
pp/5%pp-g-MA(s)/20%Fe[۱۲]	۷/۵	۱۱-۱۲/۴ GHz	-۲۱ dB	-۲ dB
pp/5%pp-g-MA(s)/1.0MWNTs/20%Fe[۱۲]	۷/۵	-	-۸ dB	-۱ dB
graphene/paraffin composite[۱۰]	۳/۵	۸/۲-۱۱ GHz	-۳۰ dB	-۶ dB
La(NO ₃) ₃ - ACNTs [۱۱]	۲	۱۲/۲-۱۲/۴ GHz	-۱۵ dB	-۲/۵ dB
ACNTs[۱۱]	۲	۱۱/۹-۱۲/۴ GHz	-۱۱/۹ dB	-۳ dB

نتیجه‌گیری

در این مقاله نحوه محاسبه ضریب جذب یا تلفات بازگشتی به روش TLM توضیح داده شده است. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های طراحی جاذب‌های چند لایه، بهینه‌یابی آن‌ها است. چون بهینه‌یابی جاذب یک تابع چند هدفه است یا به عبارتی جمعیتی است، باید از اکسترمم‌یاب‌های جمعیتی استفاده کرد. در این مقاله چگونگی بهینه‌یابی با روش MLPSO توضیح داده شده است. در نهایت با استفاده از خواص ۱۰ ماده نانو کامپوزیتی کربنی ارائه شده در مقالات دیگر یک جاذب چند لایه طراحی و بهینه‌سازی شده است. در این طراحی هدف بهینه‌یابی بیشترین میزان جذب، در بیشترین پهنای باند، با کمترین ضخامت تعیین شده است. جاذب معرفی شده با ضخامت ۳/۳ mm دارای پهنای باند جذبی -۱۱/۸ dB در کل محدوده باند X مایکروویو می‌باشد. همچنین به ازای زاویه‌های مختلف تابش نیز عملکرد جاذب محاسبه شده است. مقایسه عملکرد ساختار جاذب با مواد سازنده آن، نشان دهنده افزایش میزان جذب و پهنای باند جذبی نسبت به مواد موجود می‌باشد.

مراجع

- [1] B.A. Munk, “*Frequency selective surfaces : theory and design*,” John Wiley & Sons. pp. 1-14, 2000.
- [2] D. M. Pozar, “*Microwave engineering*,” John Wiley, New York, (2005).

- [3] Y. Sun, C. Feng, X. Liu, S. W. Or, and C. Jin, “ Synthesis, Characterization and Microwave Absorption of Carbon-coated Cu Nanocapsules”, *Materials Research* **17**, (2013) 477–482
- [4] K. Sakai, Y. Wada, and S. Yoshikado, “Composite electromagnetic wave absorber made of permalloy or Sendust and effect of sendust particle size on absorption characteristics”, *PIERS Online* **4**, (2008) 846–853
- [5] J. R. Liu, M. Itoh, T. Horikawa, K. Machida, S. Sugimoto, and T. Maeda, “Gigahertz range electromagnetic wave absorbers made of amorphous carbon-based magnetic nano-composites”, *Journal of Applied Physics* **98**, (2005) 054305-1-054305-7
- [6] J. L. Yong, L. X. Yin, and Z. Jie, “ Design of high performance multilayer microwave absorbers using fast Pareto genetic algorithm, ” *Science in China Series E: Technological Sciences* **52**, (2009) 2749-2757.
- [7] S. Chamaani, S. A. Mirtaheri, and M. A. Shooredeli, “Design of very thin wide band absorbers using modified local best particle swarm optimization,” *AEU International journal of Electronics and Communications* **62**, (2008) 549-556.
- [8] D. J. Krusienski, and W. K. Jenkins, “Design and performance of adaptive systems based on structured stochastic optimization strategies,” *IEEE Circuit and Systems Magazine* **5**, (2005) 8-20
- [9] L. C. Folgueras, M. A. Alves, and M. C. Rezende, “ Microwave absorbing paints and sheets based on carbonyl iron and polyaniline: measurement and simulation of their properties,” *Journal of Aerospace Technology and Management* **2**, (2010) 105-110
- [10] D. D. Zhang, D. L. Zhao, J. M. Zhang, L. Z. Bai, “ Microwave absorbing property and complex permittivity and permeability of graphene–CdS nanocomposite,” *Journal of Alloys and Compounds* **589**, (2014) 378–383.
- [11] T. Zhao, C. Hou, H. Zhang, R. Zhu, S. She, J. Wang, T. Li, Z. Liu, and B. Wei, “Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Amorphous Carbon Nanotubes,” *Scientific Reports* **4**, (2014) 5619
- [12] H. Q. Yuan, T. Zhang, X. Yan, X. Guo, and J. Guo, “ Electromagnetic field absorbing polypropylene Nanocomposites with tuned permittivity and permeability by Nanoiron and Carbon Nanotubes,” *The Journal Physical Chemistry* **118**, (2014) 24784–24796