

طراحی جاذب الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته محلی و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

محمد رضا کرمی*، صدف حبیبی، بابک ژاله

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

در این مقاله یک جاذب الکترومغناطیسی چندلایه بهبودیافته در محدوده فرکانسی X (۸-۱۲٫۴ GHz) طراحی شده است. برای این منظور، از ضرایب الکترومغناطیسی برخی مواد نانوکامپوزیتی بیان شده در مقالات دیگر، استفاده شده است. محاسبه تلفات بازگشتی با روش تحلیلی خط انتقال (TLM) انجام شده است. مشخصه‌های مؤثر در عملکرد ساختار جاذب معرفی شده عبارتند از: تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، جنس ماده در هر لایه، ترتیب قرارگیری لایه‌ها و تغییر ضرایب الکتریکی و مغناطیسی مواد در طیف فرکانس. با به‌کارگیری این مشخصه‌ها، بهینه‌سازی عملکرد جاذب طراحی شده با هدف دستیابی همزمان به میزان جذب بالا و تطبیق امپدانس مناسب، در بیشترین پهنای باند جذب با کمترین ضخامت، توسط دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته محلی (MLPSO) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (NSGA-II) انجام شده است. این جاذب با ضخامت ۳ mm در باند X دارای جذب بیش از ۱۸٫۵ dB- و حداکثر جذب ۵۷ dB- می‌باشد. جهت بررسی صحت طراحی ساختار جاذب معرفی شده در نرم‌افزار CST Microwave Studio شبیه‌سازی شده و تلفات بازگشتی آن به روش حل عددی الکترومغناطیسی روش انتگرال‌گیری محدود (FIT) محاسبه گردیده است. میزان خطای محاسباتی روش تحلیلی با روش عددی، بر اساس تابع خطا معرفی شده در باند X کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

کلیدواژگان: جاذب الکترومغناطیسی چندلایه، نانوکامپوزیت، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته محلی (MLPSO)، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (NSGA-II).

مقدمه

الکترومغناطیسی که در اغلب موارد فضای آزاد است، را ایجاد کند. این موضوع موجب می‌شود، موج تابشی هنگام برخورد با سطح بیرونی جاذب کمترین توان بازتابی و بیشترین توان عبوری از داخل ساختار جاذب را داشته باشد. همچنین ساختار جاذب بایستی طوری طراحی شود که بیشترین جذب را حین عبور موج الکترومغناطیسی ایجاد نماید. از موادی که می‌توانند این دو شرط را هم‌زمان تأمین کنند محیط‌های ناهمگن یا ترکیبی می‌باشند. گسترش علم نانو امکان طراحی و ترکیب هدف‌مند ساختارهای نانوکامپوزیتی برای

به‌طور کلی، جاذب‌های الکترومغناطیسی وظیفه حذف یا تضعیف امواج الکترومغناطیسی نامطلوب را دارند. از این جاذب‌ها در کاربردهای مختلف از قبیل: رادارگریزی، تجهیزات پزشکی، وسایل مخابراتی، محیط‌های اندازه‌گیری و تجهیزات الکترونیکی استفاده می‌شود [۱-۲]. ساختار یک جاذب الکترومغناطیسی هنگامی بهترین عملکرد را دارد که تطبیق امپدانس بین آخرین سطح جاذب با سطح تابش موج

* نویسنده مسئول: mohammadreza.karami56@gmail.com

فراهم می‌شود. در روند طراحی یک جاذب چندلایه، در بسیاری از موارد امکان بررسی مستقیم برای یافتن بهترین ساختار وجود ندارد. بنابراین باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. از طرف دیگر، از آنجایی که روابط بین حالت‌های ممکن طراحی، غیرخطی است، با روش‌های دیفرانسیل‌گیری معمولی نمی‌توان آنها را بهینه‌یابی نمود. لذا باید روش‌های بهینه‌سازی جمعیتی مانند: الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم تراکم جمعیتی (PSO) و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) مورد استفاده قرار گیرد [۸-۱۰].

در این تحقیق با استفاده از مشخصه‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی ۱۷ نمونه ماده نانوکامپوزیتی معرفی شده در دیگر مقالات ارائه شده در این زمینه، یک ساختار جاذب چندلایه پهن‌بند در محدوده فرکانسی باند X (۱۲.۴-۸ GHz) طراحی و بهینه‌سازی شده است. برای این منظور کدنویسی روش خط انتقال (TLM) و روش‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته محلی (MLPSO) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (NSGA-II)، در نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته است. هدف بهینه‌سازی طراحی انجام شده، برخورداری از بیشترین مقدار جذب و پهنای باند جذبی در کل محدوده فرکانسی تعیین شده است. جاذب معرفی شده، دارای پهنای باند جذبی بیش از ۹۸ درصد انرژی موج الکترومغناطیسی تابشی در کل باند فرکانسی X است. همچنین در مرکز این باند میران جذب الکترومغناطیسی به بیش از ۹۹.۹ درصد انرژی موج الکترومغناطیسی تابشی نیز می‌رسد. در آخر به منظور اطمینان از صحت طراحی انجام شده، ساختار جاذب معرفی شده در نرم‌افزار CST Microwave Studio (MWS) شبیه‌سازی شده و میزان تلفات بازگشتی (جذب)

دستیابی به خواص جذبی الکترومغناطیسی مطلوب را فراهم کرده است. به‌همین منظور به‌طور معمول در یک ماده دی‌الکتریک پایه که میرایی میدان الکتریکی در آن بالا است مانند کربن، نانو تیوب‌های کربن، گرافن‌ها، رزین‌ها، اپوکسی‌ها و پلیمرها، نانو ذرات ناخالصی به‌منظور افزایش جذب میدان مغناطیسی افزوده می‌شود. از جمله این ذرات ناخالصی می‌توان به کپسول‌های فلزی (مس، آلومینیوم، نیکل و آهن)، ذرات فرومغناطیسی، فریت‌ها، مواد آمورف، کربنیل‌آهن و سنداست‌ها اشاره کرد [۴-۳]. تضعیف هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی موج عبوری در محیط جاذب، میزان جذب را افزایش می‌دهد. تغییر در شکل، اندازه و درصد ذرات ناهمگن نقش بسیار مؤثری در تغییر مشخصه‌های گذردهی الکتریکی ($\epsilon(f) = \epsilon'(f) - j\epsilon''(f)$) و نفوذپذیری مغناطیسی ($\mu(f) = \mu'(f) - j\mu''(f)$) مواد نانو کامپوزیتی دارند [۵]. به‌همین منظور، در سال‌های اخیر خواص جذبی الکترومغناطیسی مواد نانوکامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. با وجود ایجاد مواد مناسب، همچنان یک ساختار تک‌لایه اغلب نمی‌تواند تمام محدودیت‌ها و هدف‌های مورد نیاز یک ساختار جاذب کاربردی را به‌طور هم‌زمان برآورده سازد. چند لایه‌کردن ساختار جاذب‌ها یکی از اثر بخش‌ترین روش‌ها به‌منظور افزایش میزان جذب و افزایش پهنای باند جذبی، با به‌کارگیری مواد موجود و با توجه به محدودیت‌های طراحی از قبیل ضخامت، وزن و استحکام می‌باشد [۷-۳]. در طراحی جاذب چند لایه با توجه به امکان تنظیم پارامترهای ورودی شامل: تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، ترتیب لایه‌ها، جنس لایه‌ها و تغییر ضرایب الکترومغناطیسی مواد با تغییر فرکانس، تعداد حالت‌های طراحی ممکن بسیار زیاد خواهد بود. در نتیجه امکان دستیابی به یک ساختار مناسب برای جاذب مورد نیاز

یک جاذب میرا (جذب) شود، باید مؤلفه میدان الکتریکی یا مؤلفه میدان مغناطیسی یا هر دو این مؤلفه‌ها به‌طور همزمان میرا شوند [۳]. عامل مؤثر در میرایی یا تضعیف مؤلفه میدان الکتریکی، قسمت موهومی ضریب گذردهی میدان الکتریکی ماده $\epsilon''(f)$ می‌باشد. میزان تلفات الکتریکی یک ماده توسط رابطه ۱ تحت عنوان تانژانت تلفات الکتریکی بیان می‌شود [۱۱].

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= j\omega D + J \\ &= j\omega\epsilon E + \sigma E \\ &= j\omega\epsilon' E + (\omega\epsilon'' + \sigma)E \end{aligned} \quad 1$$

$$\tan \delta_E = \frac{\omega\epsilon'' + \sigma}{\omega\epsilon'}$$

همچنین به‌طور مشابه عامل مؤثر در میرایی یا تضعیف میدان مغناطیسی، قسمت موهومی ضریب گذردهی میدان مغناطیسی ماده $\mu''(f)$ می‌باشد. بنابراین میزان تلفات مغناطیسی یک ماده توسط رابطه ۲ تحت عنوان تانژانت تلفات مغناطیسی بیان می‌گردد [۱۱].

$$\tan \delta_H = \frac{\mu''}{\mu'} \quad 2$$

همچنین با توجه به معادله موج برای میدان الکتریکی به‌دست می‌آید [۱۱]

$$\begin{aligned} \nabla^2 E + \omega^2 \mu \epsilon \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right) E &= 0 \\ \gamma &= \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}} \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x &= 0 \end{aligned} \quad 3$$

$$\begin{aligned} E_x(z) &= E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{\gamma z} \\ e^{-\gamma z} &= e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \\ &= e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \end{aligned}$$

همان‌طور که در این رابطه دیده می‌شود، دامنه موج با ضریب $e^{-\alpha z}$ در راستای انتشار خود در محیط یک ماده در حال میرا شدن می‌باشد. این روابط به‌طور مشابه برای قسمت میدان مغناطیسی نیز صادق می‌باشد. با توجه به نکات ذکر شده موادی برای استفاده در یک ساختار جاذب مناسب هستند که دارای هر چهار مؤلفه باشند.

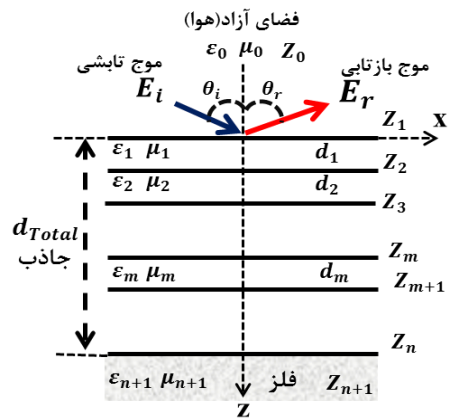
$$\epsilon''(f), \mu''(f), \mu'(f), \epsilon'(f)$$

به‌روش حل عددی الکترومغناطیسی تکنیک انتگرال‌گیری محدود (FIT) نیز محاسبه شده است.

اصول اولیه طراحی جاذب چند لایه

روش خط انتقال (TLM)

در حالت کلی مطابق شکل ۱ برای محاسبه میزان جذب یک ساختار جاذب الکترومغناطیسی چندلایه، ساختار جاذب را بر روی یک صفحه فلزی که در فرکانس عملکرد جاذب، به عنوان یک بازتاب کننده کامل و دارای امپدانس صفر است (که در اصطلاح به آن صفحه زمین نیز گفته می‌شود)، قرار می‌دهند.



شکل ۱. ساختار کلی جاذب الکترومغناطیسی چندلایه.

یک ساختار جاذب چندلایه به‌منظور جذب مناسب موج الکترومغناطیسی تابشی به سطح خود باید به‌طور هم‌زمان دو شرط اصلی را برآورده سازد. در ابتدا با ایجاد یک مبدل تطبیق امپدانس مناسب بین محیط تابش موج (فضای آزاد) و صفحه فلزی، باعث ورود حداکثر توان موج به داخل ساختار جاذب و عبور آن از تمامی لایه‌های جاذب شود، به‌گونه‌ای که کمترین بازتاب را از هر یک از سطوح لایه‌های جاذب فراهم سازد. سپس ساختار جاذب باید توانایی جذب یا میرا کردن توان موج الکترومغناطیسی عبوری را داشته باشد. به‌طور کلی برای اینکه یک موج الکترومغناطیسی در

نانو کامپوزیت‌های ساخته شده از مواد دی‌الکتریکی مانند: کربن، رزین، پلیمرها، نانو تیوب‌ها کربنی و اپوکسی‌ها دارای ضریب میرایی الکتریکی نسبتاً مناسبی هستند و برای افزایش ضریب جذب مغناطیسی درون آنها ذرات ناخالصی مانند: فلزات، ذرات فرومغناطیسی، سداست‌ها و... افزوده می‌شود.

در یک نگاه کلی می‌توان گفت در یک ساختار جاذب الکترومغناطیسی چندلایه، لایه‌های مجاور با فضای انتشار موج الکترومغناطیسی (فضای آزاد) بیشتر نقش تطبیق امپدانس و هدایت موج به داخل جاذب را به‌عهده دارند. اما لایه‌های نزدیک به سطح فلز عمدتاً نقش جذب و میرا کنندگی موج را ایفاء می‌کنند.

اگر روی یک فلز جاذبی با امپدانس کل Z_1 قرار داده شود ضریب بازتاب آن از رابطه ۴ و تلفات بازگشتی از رابطه ۵ به دست می‌آید [۱۱].

$$\Gamma_{Total} = \frac{z_1 - z_0}{z_1 + z_0} = \frac{z_1 - 1}{z_1 + 1} \quad 4$$

$$R_{dB}(dB) = 20 \log(|\Gamma_{Total}|) \quad 5$$

که در آن z_0 امپدانس هوا می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است به هوا شماره ۰ و به فلز شماره $n+1$ اختصاص داده شده است. برای محاسبه امپدانس کل جاذب چند لایه از سطح فلز که امپدانس صفر دارد شروع می‌کنند و تا سطح تابش از روابط بازگشتی ۶ تا ۱۰ استفاده می‌شود [۱۱].

$$Z_n = k_n \frac{Z_{n+1} + k_n \cdot \tanh(\gamma_n d_n)}{k_n + Z_{n+1} \cdot \tanh(\gamma_n d_n)} \quad 6$$

$$\vdots$$

$$Z_2 = k_2 \frac{Z_3 + k_2 \cdot \tanh(\gamma_2 d_2)}{k_2 + Z_3 \cdot \tanh(\gamma_2 d_2)} \quad 7$$

$$Z_1 = k_1 \frac{Z_2 + k_1 \cdot \tanh(\gamma_1 d_1)}{k_1 + Z_2 \cdot \tanh(\gamma_1 d_1)} \quad 8$$

$$\gamma_n = j \cdot \omega \cdot \sqrt{\mu_n \cdot \epsilon_n} \quad 9$$

$$k_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\epsilon_n}} \quad 10$$

متغیرهای اصلی طراحی یک جاذب الکترومغناطیسی چند لایه همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است عبارتند از: تعداد لایه‌ها، ترتیب قرارگیری لایه‌ها، ضخامت هر لایه، ضخامت کل ساختار، جنس هر لایه و تغییر ضرایب الکترومغناطیسی مواد در هر فرکانس خاص [۳ و ۱۲]. بنابراین با توجه به وجود این متغیرها در طراحی ساختار یک جاذب چند لایه، تغییر در میزان هر یک از ضخامت‌ها (d_i)، نوع ماده مورد استفاده در هر لایه (μ_m و ϵ_m) و ترتیب قرارگیری (n) مواد مختلف در ساختار جاذب، موجب به‌وجود آمدن جایگشت‌های ریاضی مختلفی در روابط بیان شده می‌شود. این موضوع تعداد حالت‌های ممکن طراحی یک جاذب چند لایه را بسیار زیاد می‌کند. همچنین از طرف دیگر در اغلب کاربردهای عملی، ساختار جاذب باید طوری طراحی شود که دارای میزان جذب مناسبی در تمامی و یا بخشی از محدوده فرکانسی کاری تعیین شده برای آن باشد. علاوه‌براین در ساختار جاذب طراحی شده، میزان جذب در هر فرکانس یک مقدار معینی می‌باشد. در نتیجه با توجه به مطالب بیان شده، در حالت کلی، طراحی یک ساختار جاذب الکترومغناطیسی با تعیین هدف‌های اولیه طراحی از قبیل: میزان جذب مشخص، فرکانس کاری تعیین شده، محدودیت‌های ضخامتی، نحوه پیاده‌سازی و ساخت (محدودیت تعداد لایه‌ها) و نوع کاربرد، یک تابع چند هدفه می‌باشد. در هر یک از حالت‌های ممکن در طراحی یک ساختار جاذب، بهتر بودن عملکرد جاذب نسبت به سایر حالت‌ها یک امری نسبی و مقایسه‌ای است. بنابراین در روند طراحی ساختار جاذب لازم است که یک تابع هدف مشخص توسط طراح تعیین شود. وجود این تابع موجب می‌شود که امکان بررسی مشخصات جذبی را در هر یک از حالت‌های ممکن طراحی، نسبت به دیگر حالت‌ها به‌وجود آید.

۴

۵

۶

۷

۸

۹

۱۰

بود. این مقدار اولیه در یک ماتریس به‌عنوان بهترین نقاط محلی و بهترین نقاط مطلق ذخیره می‌شود. سپس مکان جدید با توجه به اکسترم‌های منطقه‌ای و اکسترم کل برای جستجوی جدید تعیین می‌شود. برای این منظور تعدادی از اعضاء در این بخش از جمعیت به‌طور تصادفی مورد بررسی قرار گرفته و اکسترم جدید جایگزین می‌شود. در این روش اکسترم‌های منطقه‌ای تا یک همسایگی بیشینه می‌توانند در جذب سایر نقاط تأثیر بگذارند. این تأثیر محدود موجب جستجو در تمام فضای جمعیت مسئله می‌شود. بنابراین انجام این جستجو، از گیر افتادن جواب مسئله در دام اکسترم‌های محلی جلوگیری می‌کند. اعداد تصادفی در مرحله بعد توسط معادلات ۱۱ و ۱۲ محاسبه شده و بهترین نقاط محلی حاصل می‌شود. اگر این نقاط بهتر از نقاط مطلق قبلی بودند جایگزین آنها می‌شوند. با تکرار این روند جمعیت به سمت بهترین نقطه متمرکز می‌گردد [۱۲]. تعیین حرکت ذرات در هر مرحله از روابط ۱۱ و ۱۲ به‌دست می‌آید [۱۲].

$$x_i(d) = x_i(d) + v_i(d) \quad 11$$

$$v_i(d) = \omega \times v_i(d) + c_1 \times \text{rand}(p_i(d) - x_i(d)) + c_2 \times \text{rand}(p_g(d) - x_i(d)) \quad 12$$

در این معادلات $x_i(d)$ و $v_i(d)$ مکان و سرعت ذره i ام در دیمانسیون d هستند. همچنین ω ضریب وزنی نقاط بهینه می‌باشد. تابع rand به‌منظور ایجاد اعداد تصادفی بین محدوده [۰، ۱] است. c_1 و c_2 ثابت‌های مثبتی هستند که شتاب ثابت نامیده می‌شوند. رابطه ۱۱ مکان جدید را با توجه به مکان قبل و با سرعت حرکت $v_i(d)$ تولید می‌کند. در رابطه ۱۲ سرعت حرکت ذره محاسبه می‌شود. در سمت راست تساوی مربوط به این رابطه، عبارت اول جابه‌جایی فعلی ذره، عبارت دوم اثر حافظه ذره (بهترین پاسخ فردی) و عبارت سوم اثر

از آنجایی که بهینه‌سازی ساختار جاذب چند لایه در یک محدوده فرکانسی مشخص، یک تابع چند هدفه است، تعداد اکسترم‌های منطقه‌ای آن نیز بسیار زیاد می‌باشد. لذا برای این منظور از روش‌های قدیمی و ساده اکسترم یابی مانند: دیفرانسیل‌گیری معمولی، روش گوسی-نیوتن و روش‌های محاسباتی خطی، استفاده نمی‌شود. دلیل این امر آن است که این روش‌ها برای انجام طراحی جاذب مورد نظر دارای معایبی از قبیل حجم بسیار زیاد محاسبات، هوشمند نبودن به‌منظور تعیین بهترین حالت طراحی (اکسترم مطلق) و معرفی اکسترم محلی به‌جای اکسترم مطلق، می‌باشند [۱۲]. در نتیجه برای تعیین حالت طراحی بهینه باید از روش‌های بهینه‌سازی جمعیتی استفاده شود. از مهمترین روش‌های متداول بهینه‌سازی جمعیتی در این زمینه می‌توان به الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) اشاره کرد [۱۴-۱۳].

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته محلی (MLPSO)

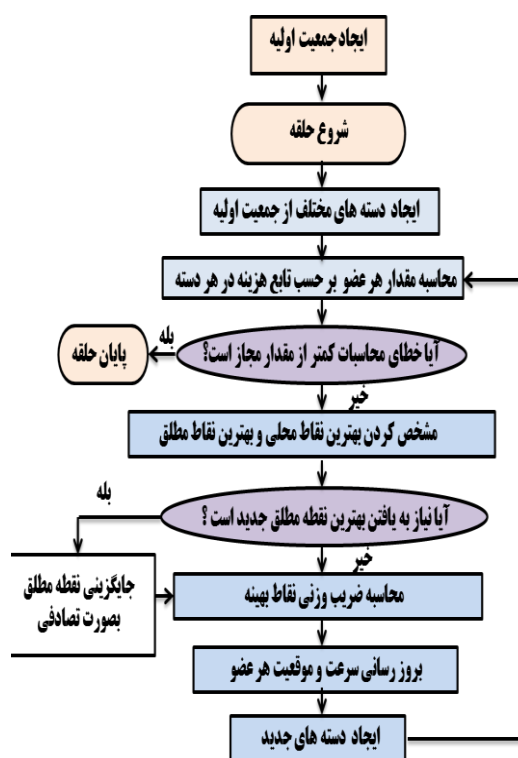
در روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) از نحوه حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها برای یافتن غذا الگوبرداری شده است. این روش به‌دلیل عدم نیاز به گرادیان‌گیری و سرعت همگرایی بالا، دارای حجم محاسباتی کمتری نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی است. نقطه ضعف نسخه اصلی PSO گیر افتادن در دام اکسترم‌های محلی است. برای رفع این مشکل نسخه ارتقاء یافته MLPSO ارائه شده است [۱۲]. در روش MLPSO جمعیت مورد بررسی به‌طور تصادفی به دسته‌های کوچکتر تقسیم می‌شود. این دسته‌ها ابتدا با یکدیگر همپوشانی ندارند. در این جمعیت هر عضو با توجه به پاسخ تابع هزینه مورد استفاده در روش بهینه‌سازی دارای یک مقدار و یک معیار تناسب خواهد

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نوع دوم (NSGA-II)

روش دیگر در زمینه بهینه‌سازی جمعیتی یا چند هدفه، به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA) است. در این روش، هر یک از پاسخ‌های مسئله بر اساس این که چند پاسخ بهتر از آن وجود داشته باشد، رتبه‌بندی و دسته‌بندی می‌شوند. لذا پاسخی از مسئله که هیچ پاسخی دیگر به‌طور قطع بهتر از آن نباشد، دارای بیشترین امتیاز یا بالاترین رتبه خواهد بود. برای این منظور از روش پارتو استفاده می‌شود. پارتو فرانت روش مرتب‌سازی غیرمغلوب را اولین بار در زمینه اقتصاد و در کاربرد بورس مطرح کرد. در روش پارتو وضعیتی نسبت به قبل بهتر خواهد بود که بتواند حداقل موقعیت یک مورد را بهبود بخشد بدون اینکه در موقعیت دیگر اعضا اختلال ایجاد نماید. به‌طور کلی در یک بهینه‌یابی چند هدفه، تعدادی تابع هدف مختلف وجود دارند که تمایل به یافتن کمینه یا بیشینه آنها به‌طور هم‌زمان در طراحی مورد نظر وجود دارد. اغلب این توابع هدف، در نقطه‌ی مقابل یکدیگر قرار دارند، به‌طوری که بهبود یکی از آنها، موجب بدتر شدن دیگری می‌شود. بنابراین در این گونه مسائل برخلاف مسائل تک هدفی که تنها یک نقطه‌ی اکسترمم برای مسئله وجود دارد، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به‌عنوان جواب به‌دست می‌آیند که به اصطلاح نقاط بهینه پارتو یا منحنی پارتو خوانده می‌شوند [۱۴]. به‌عبارت دیگر در این روش، یک معیار شایستگی (برازندگی) به هر پاسخ مسئله اختصاص داده می‌شود. همچنین از شیوه اشتراک برازندگی (Fitness Sharing) که نمایانگر تکرار ژن‌های غالب در جبهه پارتو است، برای پاسخ‌های مربوط به یک همسایگی استفاده می‌شود. این کار موجب می‌شود که پاسخ‌ها به‌نحو مطلوبی و به‌صورت یکنواخت در

گروه ذرات (بهترین پاسخ جمعی) می‌باشد [۱۲]. در رابطه ۱۲، ω ضریب وزنی نقاط بهینه، باید هوشمندانه تعیین شود تا رسیدن به جواب سریع‌تر و دقیق‌تر انجام شود. در نسخه‌های مختلف PSO ضریب وزنی ω متفاوت است و نحوه تعیین این ضریب نقش اساسی در عملکرد آنها دارد. در روش MLPSO ضریب وزنی ω (در m امین مرحله تکرار) از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود [۱۲].

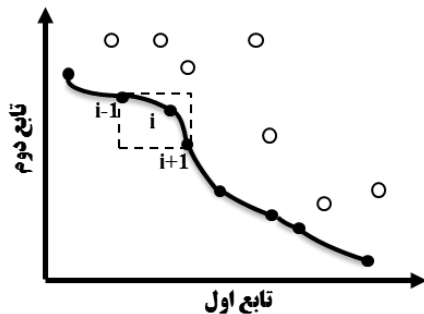
$$\omega(m) = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\max_iter} m \quad 13$$



شکل ۲. فلوجارت کلی الگوریتم MLPSO.

در رابطه ۱۳، متغیر \max_iter نشان‌دهنده بیشترین شماره تکرار تعیین شده است. الگوریتم کلی روند اعمال روش بهینه‌سازی MLPSO در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$d_j(k) = \sum_{i=1}^n \frac{f_i(k+1) - f_i(k-1)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad ۱۴$$

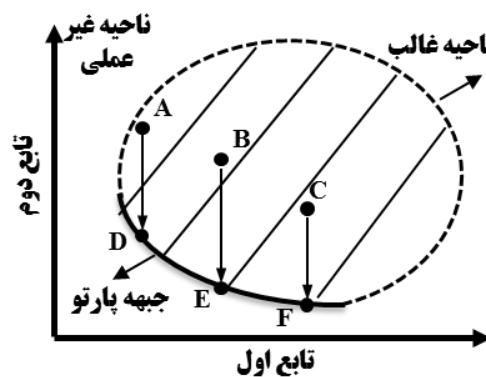


شکل ۴. نمایش فاصله تراکمی در جبهه پارتو دو بعدی.

نخبه‌گرایی: ذخیره کردن تعدادی از پاسخ‌های نامغلوب براساس رتبه‌ای که در مراحل قبلی الگوریتم به دست آورده‌اند.

به‌طورکلی مراحل انجام روش NSGA-II به ترتیب عبارتند از: ۱- تولید یک جمعیت نمونه اولیه به صورت تصادفی، ۲- ارزیابی جمعیت تولید شده از دید تابع هدف تعریف شده، ۳- اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب، ۴- محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله تراکمی، ۵- انتخاب جمعیت والدین یا بهترین یافته‌ها برای نسل‌های بعدی، ۶- انجام جهش و تقاطع [۷]. معیارهای انتخاب در الگوریتم NSGA-II در درجه اول، رتبه پاسخ و در درجه دوم فاصله تراکمی مربوط به پاسخ است. در الگوریتم NSGA-II از میان پاسخ‌های هر نسل، تعدادی از آنها با استفاده از روش انتخاب مقایسه‌ای دو-دویی انتخاب می‌شوند. با تکرار عملگر انتخاب مقایسه‌ای دو-دویی بر روی جمعیت هر نسل ایجاد شده، مجموعه‌ای از افراد آن نسل برای شرکت در تقاطع (Crossover) و جهش (Mutation) انتخاب می‌شوند. بر روی بخشی از مجموعه افراد انتخاب شده، عمل تقاطع و بر روی بقیه، عمل جهش انجام می‌شود. با انجام اینکار جمعیت متشکل از فرزندان و جهش یافتگان ایجاد می‌گردد. در ادامه، این

فضای جستجو (جمعیت اولیه) از محیط مسئله پراکنده یا توزیع شوند. در سال‌های اخیر به‌منظور برطرف نمودن معایب روش بهینه‌سازی NSGA از نسخه ارتقاء یافته NSGA-II استفاده شده است [۹ و ۱۲]. تفاوت‌های اصلی NSGA-II نسبت به NSGA عبارتند از: ۱- استفاده از عملگر انتخاب مقایسه‌ای دو-دویی در مقایسه پارتو. در این مقایسه جواب A بر جواب C غالب است اگر دو شرط برقرار باشد: ۱- جواب A در هیچ یک از اهداف بدتر از C نباشد. ۲- جواب A دست کم در یک هدف بهتر از جواب C باشد. در نتیجه جواب‌های به‌دست آمده در جبهه پارتو قرار می‌گیرند. جبهه پارتو در موارد دو هدفه روی یک منحنی خطی و در موارد سه هدفه روی یک صفحه و در موارد n هدفه روی یک رویه n بعدی قرار می‌گیرد.



شکل ۳. جبهه پارتو دو هدفه یا دو بعدی.

تعریف فاصله تراکمی (Crowding Distance) معیار فاصله تراکمی در NSGA-II جایگزین اشتراک برازندگی در NSGA شده است. فاصله تراکمی نقاط روی جبهه پارتو نشان دهنده فاصله متوسط نزدیکترین نقاط بهینه روی جبهه پارتو نسبت به یک نقطه روی جبهه پارتو می‌باشد و با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود. طرح فاصله تراکمی در حالت دو هدفه در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۵].

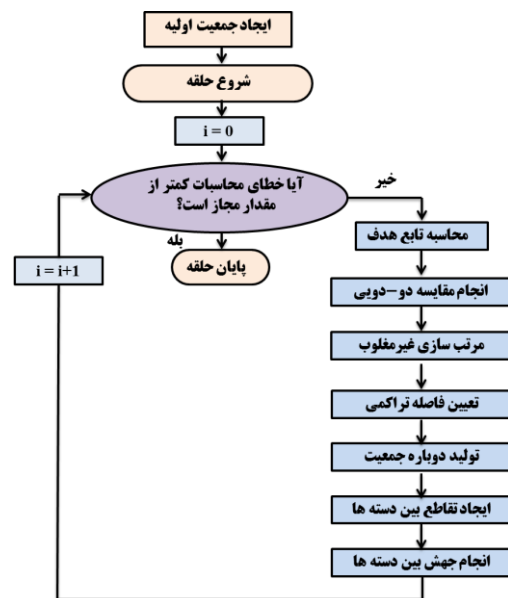
جمعیت با جمعیت اصلی ترکیب شده و یک جمعیت جدید به وجود می‌آورند. در این جمعیت، ابتدا اعضاء برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. سپس اعضایی از جمعیت که دارای رتبه یکسانی هستند، با توجه به فاصله تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. پس از اتمام معیار گذاری، به تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضایی از جمعیت جدید که در صدر فهرست مرتب شده می‌باشند، انتخاب شده و بقیه اعضاء جمعیت جدید دور ریخته می‌شوند. این اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند...

۱۷ ماده نانو کامپوزیتی ارائه شده در مقالات معتبر موجود در این زمینه [۲۲-۱۶]، به عنوان اطلاعات اولیه مطابق جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که این ضرایب به ازای فرکانس‌های مختلف متفاوت است، اطلاعات هر یک از این ضرایب در گام‌های فرکانسی ۰.۲ GHz به صورت مجزا در مراجع [۲۲-۱۶]، بیان شده است. بنابراین در این مقاله به منظور محاسبه میزان تلفات بازگشتی در ساختار جاذب طراحی شده، در هر لایه و در هر فرکانس از ضرایب الکترومغناطیسی مربوط به آن به صورت مجزا استفاده شده است. سپس با تعیین مشخصه‌های مورد نظر و محدودیت‌های عملکردی (تعداد لایه‌ها و ضخامت مربوط به آن‌ها)، ساختار جاذب مورد نظر طراحی شده است. برای محاسبه تلفات بازگشتی از تئوری بیان شده در بخش روش خط انتقال (TLM) استفاده شده است. همچنین به منظور بهبود عملکرد ساختار جاذب طراحی شده از روش‌های بهینه‌سازی MLPSO و NSGA-II در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. با توجه به اینکه در طراحی ارائه شده هدف به دست آوردن بیشترین میزان جذب، در بیشترین پهنای باند جذبی با کمترین ضخامت تعیین شده است، لذا انتخاب نوع مواد لایه‌ها، ترتیب چینش لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها بر اساس توابع هدف توسط روش‌های بهینه‌سازی، به صورت هوشمندانه انجام شده است. برای این منظور سه تابع هدف، بیشترین میانگین میزان جذب، بیشترین پهنای باند جذبی و حداقل ضخامت ممکن، به ترتیب مطابق روابط (۱۹-۱۵) مورد استفاده قرار گرفته است

$$F_1 = \max \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M R^{TE}(f_i, \theta_j) + R^{TM}(f_i, \theta_j)}{2KM} \quad 15$$

$$F_2 = \max \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M C^{TE}(f_i, \theta_j) + C^{TM}(f_i, \theta_j)}{2KM} \quad 16$$

جمعیت با جمعیت اصلی ترکیب شده و یک جمعیت جدید به وجود می‌آورند. در این جمعیت، ابتدا اعضاء برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. سپس اعضایی از جمعیت که دارای رتبه یکسانی هستند، با توجه به فاصله تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. پس از اتمام معیار گذاری، به تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضایی از جمعیت جدید که در صدر فهرست مرتب شده می‌باشند، انتخاب شده و بقیه اعضاء جمعیت جدید دور ریخته می‌شوند. این اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند...



شکل ۵. فلوچارت کلی الگوریتم NSGA-II.

چرخه مذکور در این بخش، تا محقق شدن شرایط پایان یافتن روش بهینه‌یابی، تکرار می‌شود. الگوریتم کلی روند اعمال روش بهینه‌سازی NSGA-II در شکل ۵ نشان داده شده است

طراحی جاذب چند لایه بهبود یافته

برای طراحی جاذب ابتدا ضرایب گذردهی الکتریکی $(\epsilon(f) = \epsilon'(f) - j\epsilon''(f))$ و نفوذپذیری مغناطیسی

این ارزش گذاری با رابطه ۱۷ انجام شده است. در این طراحی $R_{ref} = 10dB$ در نظر گرفته شده است. تابع F_3 به منظور دستیابی به حداقل ضخامت تعریف شده است. با استفاده از رابطه ۱۹ حداکثر و حداقل ضخامت مجاز هر لایه و حداکثر ضخامت مجاز کل لایه‌ها را کنترل می‌کنیم.

محدودیت‌های فیزیکی در نظر گرفته شده در این طراحی عبارتند از: ضخامت مجاز هر لایه (d_i) بین 0.1 mm تا 2 mm و حداکثر ضخامت کل ساختار d_{Tref} با 3 mm رابطه ۱۹ تعیین شدند. همچنین در این طراحی حداکثر تعداد لایه‌ها (n) برابر ۶ در نظر گرفته شده است.

$$C^{TE/TM}(f_i, \theta_j) \quad 17$$

$$= \begin{cases} 1 & R^{TE/TM}(f_i, \theta_j) < R_{ref} \\ 0 & R^{TE/TM}(f_i, \theta_j) > R_{ref} \end{cases}$$

$$F_3 = \min \left[K \sum_{N=1}^n d_N \right] \quad 18$$

$$K = \begin{cases} 1 & d_{NrefL} < d_N < d_{NrefU}, \sum d_N < d_{Tref} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad 19$$

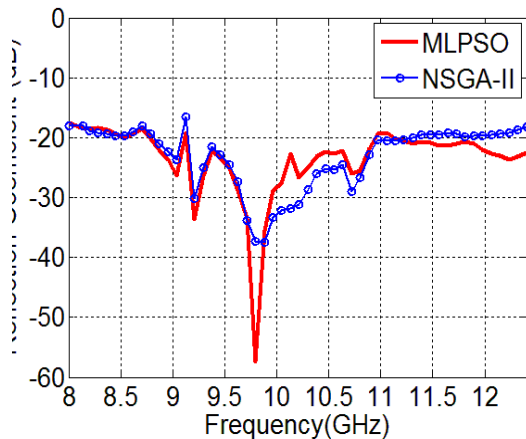
در این روابط N شماره هر لایه، i شماره گام‌های فرکانس و j شماره گام‌های زاویه‌ای است. تابع F_1 با هدف دستیابی به حداکثر متوسط جذب در کل بازه فرکانسی و در تمامی زوایا نوشته شده است. تابع F_2 به منظور دستیابی به بیشترین پهنای باند جذبی نوشته شده است. به این ترتیب که به حالتی که جذب آن بیشتر از R_{ref} نظر بوده ارزش ۱ و به حالتی که میزان جذب از این مقدار کمتر بوده ارزش ۰ داده شده است.

جدول ۱. ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی مواد نانو کامپوزیتی به کار برده شده در طراحی جاذب الکترومغناطیسی معرفی شده در محدوده

$$\left\{ f_i \mid f_i = 8.2, 8.4, 8.6, \dots, 12.2, 12.4 \text{ GHz} \right\} \text{ باند } x \text{ با گام‌های فرکانسی } 0.2, 0.4 \text{ GHz}$$

شماره ماده	فرمول اختصاری نانو کامپوزیت	$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ($f = 8 - 12.4 \text{ GHz}$)	$\mu = \mu' - j\mu''$ ($f = 8 - 12.4 \text{ GHz}$)
۱	pp/5%pp-g-MA(s)/20%Fe[۱۶]	{4.89-j0.50, 4.88-j0.51, ...}	{1.078-j0.08, 1.079-j0.0, ...}
۲	pp/5%pp-g-MA(s)/1.0MWNTs[۱۶]	{3.26-j0.35, 3.24-j0.37, ...}	{1.00-j0.00, 1.00-j0.00, ...}
۳	pp/5%pp-g-MA(s)/1.0MWNTs/20%Fe[۱۶]	{4.24-j0.25, 4.23-j0.20, ...}	{1.00-j0.08, 1-j0.085, ...}
۴	pp/5%pp-g-MA(L)/1.0MWNTs/20%Fe[۱۶]	{3.95-j0.26, 3.90-j0.0.27, ...}	{1.00-j0.00, 1.00-j0.01, ...}
۵	MWCNTs[۱۷]	{8.10-j1.20, 8.08-j1.19, ...}	{1.13-j0.04, 1.132-j0.02, ...}
۶	ACNTs[۱۷]	{5.45-j0.49, 5.45-j0.49, ...}	{1.13-j0.07, 1.13-j0.068, ...}
۷	La(NO ₃) ₃ -ACNTs [۱۷]	{5.90-j2.25, 5.83-j2.30, ...}	{1.26-j0.075, 1.25-j0.075, ...}
۸	α -Fe/C(a) resin composites with 75 wt% powders[۱۸]	{12.1-j0.21, 12.11-j0.26, ...}	{1.55-j0.93, 1.53-j0.92, ...}
۹	Fe ₂ B/C(a) resin composites with 75 wt% powders[۱۸]	{12.7-j0.70, 12.69-j0.71, ...}	{1.40-j0.60, 1.38-j0.601, ...}
۱۰	paraffin-Cu nanocapsules composite[۴]	{15.6-j6.25, 14.2-j6.00, ...}	{1.00-j0.00, 1.00-j0.00, ...}
۱۱	$Nd_6 Fe_{91} N_3$ composition after ball-milling 90h[۱۹]	{47.5-j11.8, 46.0-j11.39, ...}	{2.40-j2.09, 2.3-j2.07, ...}
۱۲	G-CdS/paraffin composite[۲۰]	{6.20-j2.81, 6.15-j2.80, ...}	{0.92-j0.02, 0.93-j0.025, ...}
۱۳	graphene/paraffin composite[۲۰]	{8.30-j6.10, 8.2-j5.98, ...}	{0.99-j0.01, 0.98-j0.01, ...}
۱۴	Paint produced with polyaniline and carbonyl iron[۲۱]	{5.31-j1.32, 5.29-j1.32, ...}	{1.15-j0.05, 1.15-j0.05, ...}
۱۵	silicone rubber L9000[۲۱]	{6.60-j2.25, 6.50-j2.25, ...}	{1.25-j0.90, 1.25-j0.9, ...}
۱۶	Fe-phthalocyanine/Fe ₃ O ₄ hybrid microspheres at 1.0 g additions of bis-phthalonitril[۲۲]	{9.60-j3.25, 9.30-j3.10, ...}	{0.90-j0.07, 0.93-j0.075, ...}
۱۷	Fe-phthalocyanine/Fe ₃ O ₄ hybrid microspheres at 0.2 g additions of bis-phthalonitril[۲۲]	{8.75-j2.55, 8.50-j2.60, ...}	{0.77-j0.06, 0.80-j0.09, ...}

ضرایب وزنی هوشمندانه‌تر نسبت به NSGA-II، در نتیجه MLPSO دقت بالاتری در معرفی پاسخ بهینه داشته است.



شکل ۶. میزان تلفات بازگشتی (جذب) ساختارهای جاذب نانو کامپوزیتی طراحی شده به‌ازای تابش عمود.

به‌منظور اطمینان از درستی طراحی ساختارهای جاذب معرفی شده با به‌کارگیری روش تحلیلی TLM، در نرم‌افزار شبیه‌ساز CST Microwave Studio با به‌کارگیری روش حل عددی الکترومغناطیسی تکنیک انتگرال‌گیری محدود (FIT)، میزان جذب هر یک از ساختار جاذب‌های طراحی شده، به‌ازای فرکانس‌های مختلف در محدوده باند فرکانسی X محاسبه گردیده است. برای این منظور ابتدا، مطابق مقادیر ارائه شده در جدول ۲، ساختار هر یک از جاذب‌های الکترومغناطیسی معرفی شده به‌صورت یک ساختار سه بعدی در نرم‌افزار CST مدل شده و سپس با تاباندن موج صفحه‌ای الکترومغناطیسی عملکرد این جاذب به‌کمک روش عددی تمام موج FIT مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی میزان جذب جاذب‌های نانوکامپوزیتی معرفی شده، با به‌کارگیری دو روش TLM و FIT در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۲. ساختار جاذب نانو کامپوزیتی معرفی شده.

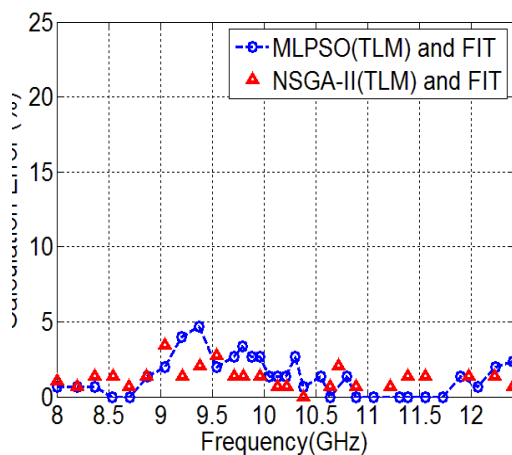
شماره لایه	شماره ماده نانو کامپوزیتی در جدول ۱		ضخامت لایه (mm)	
	MLPSO	NSGA-II	MLPSO	NSGA-II
لایه ۱	۳	۸	۱	۰/۵
لایه ۲	۶	۱۵	۰/۲	۱
لایه ۳	۱۵	۹	۱	۰/۱
لایه ۴	۱۱	۸	۰/۳	۰/۳
لایه ۵	۴	۱۱	۰/۳	۱
لایه ۶	۸	۸	۰/۲	۰/۱
لایه ۷	فلز			
ضخامت کل ساختار جاذب			۳ mm	۳ mm

در نهایت دو ساختار جاذب ۶ لایه بهبود یافته با ضخامت کل ۳ mm برای هر ساختار، توسط دو روش بهینه‌سازی MLPSO و NSGA-II مطابق جدول ۲ طراحی شده است. در جدول ۲ ترتیب لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها و جنس لایه‌های این جاذب‌ها ذکر شده است. مشخصات ضرایب الکترومغناطیسی مواد نانو کامپوزیتی مورد استفاده در طراحی‌های انجام شده به‌ازای فرکانس‌های مختلف در محدوده باند X، در جدول ۱ ارائه شده است. میزان جذب (تلفات بازگشتی) ساختارهای جاذب طراحی شده به‌ازای تابش عمودی موج الکترومغناطیسی ($\theta_i = 0$ در شکل ۱) در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود جاذب معرفی شده در روش MLPSO تلفات بازگشتی کمتر از -18.5 dB در کل محدوده (بیش از ۹۷ درصد) را دارد و بیشترین میزان جذب آن به -57 dB در باند X می‌رسد. و جاذب معرفی شده در روش NSGA-II تلفات بازگشتی کمتر از -17 dB در کل محدوده را دارد و بیشترین میزان جذب آن -37 dB در باند X است. با توجه به طراحی‌های انجام شده با وجود اینکه MLPSO از سرعت کمتر و حجم بیشتری برخوردار است، اما به‌دلیل اینکه در هر مرحله توابع هدف مجدداً محاسبه می‌شوند و همچنین به‌دلیل اعمال

روش FIT معرفی شده‌اند. درصد خطای محاسبه شده با دو روش در شکل ۸ نشان داده شده است.

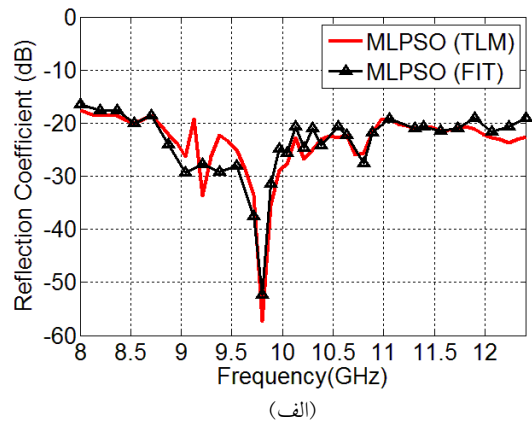
$$E_{(ps0-FIT)} = \frac{\sum_i \sum_j |R_{ij}(MLPSO) - R_{ij}(FIT)|}{\sum_i \sum_j R_{ij}(MLPSO)} \quad 20$$

$$E_{(NSGA-FIT)} = \frac{\sum_i \sum_j |R_{ij}(NSGA-II) - R_{ij}(FIT)|}{\sum_i \sum_j R_{ij}(NSGA-II)} \quad 21$$

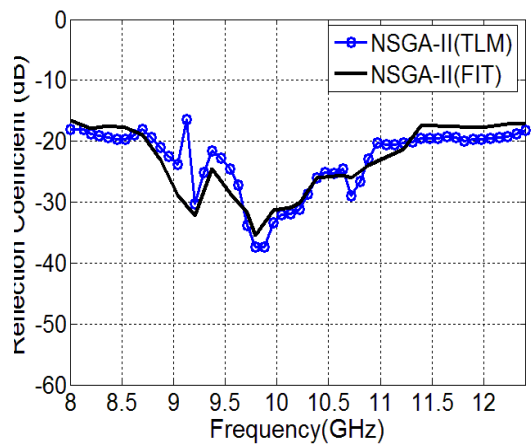


شکل ۸. نمودار درصد خطای محاسبه روش‌های تحلیلی با روش‌های عددی.

به‌منظور مقایسه عملکرد ساختار جاذب‌های طراحی شده، عملکرد آن‌ها با چند نمونه از جاذب‌های معرفی شده در مقالات دیگر مقایسه شده است. همان‌طوری که در مقایسه‌های جدول ۳ نیز دیده می‌شود مهم‌ترین ویژگی جاذب‌های بهینه شده چند لایه رسیدن به گستره پهنای باند جذبی بالا است. از طرف دیگر ضریب جذبی جاذب چند لایه به‌صورت یک مجموعه سنجیده می‌شود که در این مجموعه تنها عامل مؤثر نوع مواد موجود نمی‌باشد بلکه ترتیب و ضخامت هر لایه تأثیر بسیار زیادی در میزان جذب دارد. این موضوع به طراح امکان می‌دهد با منابع محدود و با توجه به اهداف طراحی ساختار جاذب مورد نیاز خود را تهیه کند.



(الف)



(ب)

شکل ۷. میزان تلفات بازگشتی محاسبه شده ساختارهای جاذب نانو کامپوزیتی طراحی شده با روش‌های TLM و FIT در تابش عمودی، الف) روش MLPSO، ب) روش NSGA II

همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۷ دیده می‌شود تفاوت اندکی بین نتایج به‌دست آمده از طریق روش عددی FIT و روش تحلیلی TLM وجود دارد. این تفاوت ناشی از تقریب مورد استفاده در روش‌های عددی با توجه به محدودیت تعداد سلول‌ها و حجم و زمان مورد نیاز محاسبات عددی می‌باشد. در صورتی که تعداد سلول‌ها به سمت بی‌نهایت میل کند میزان خطای روش عددی به صفر میل خواهد کرد. برای محاسبه اختلاف نتایج حاصل از انجام محاسبات با دو روش TLM و FIT روابط محاسبه خطای (۲۰) و (۲۱)، به‌ترتیب برای ساختار جاذب بهبودیافته طراحی شده با روش MLPSO و NSGA-II، در مقایسه با

ضخامت قابل ساخت برای هر لایه و تعیین حداکثر ضخامت کل ساختار جاذب معرفی شده. در هر دو ساختار جاذب‌های معرفی شده میزان ضخامت کل برابر با ۳ mm می‌باشد. در ساختار جاذب بهبودیافته با روش NSGA-II در کل محدوده باند فرکانسی X، پهنای باند جذبی ۱۷ dB- به دست آمده است و حداکثر میزان جذب آن به ۳۷ dB- نیز می‌رسد. در ساختار جاذب بهبودیافته با روش MLPSO پهنای باند جذبی ۱۸٫۵ dB- در محدوده باند فرکانسی X به دست آمده است. همچنین حداکثر میزان جذب در ساختار این جاذب به ۵۷ dB- نیز می‌رسد. برای بررسی صحت طراحی انجام شده، ساختار جاذب معرفی شده، در نرم‌افزار CST Microwave Studio شبیه‌سازی شده و مقدار تلفات بازگشتی آن به روش حل عددی الکترومغناطیسی روش انتگرال‌گیری محدود (FIT) محاسبه شده است. همچنین برای مقایسه نتایج به دست آمده از محاسبات تحلیلی با عددی، به ازای هر یک از ساختار جاذب طراحی شده، یک تابع خطا نیز ارائه شده است.

مراجع

- [1] B. Music, A. Znidarsic, P. Venturini, Electromagnetic absorbing materials, *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials* 41, (2011) 92-96.
- [2] F. Bilotti, A. Toscano, K.B. Alici, L. Vegni, Design of miniaturized narrowband absorbers based on resonant-magnetic inclusions, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 53,(2011)63-72.
- [3] S.E. Lee, J.H. Kang, C.G. Kim, Fabrication and design of multi-layered radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites, *Composite Structures* 76, (2006) 397-405.
- [4] Y. Sun, C. Feng, X. Liu, S.W. Or, C. Jin, Synthesis, Characterization and Microwave Absorption of Carbon-coated Cu Nanocapsules, *Materials Research* 17, (2013) 477-482.

جدول ۳. مقایسه عملکرد جاذب‌های الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی.			
حداکثر میزان جذب	پهنای باند با جذب بیشتر از ۱۰ dB-	ضخامت mm	جاذب
-۵۷ dB	۸-۱۲٫۴ GHz	۳	طراحی شده با MLPSO
-۳۷ dB	۸-۱۲٫۴ GHz	۳	طراحی شده با NSGA-II
-۱۳ dB	۱۱٫۵-۱۲٫۴ GHz	۲	ماده شماره ۶ [۱۶]
-۸ dB	-	۷/۵	ماده شماره ۴ [۱۵]
-۲۶ dB	۱۰٫۵-۱۲٫۴ GHz	۲	ماده شماره ۱۱ [۱۸]
-۱۱ dB	۹-۱۰٫۵ GHz	۳	ماده شماره ۱۵ [۲۰]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک ساختار جاذب پهن‌باند چندلایه در محدوده فرکانسی باند X معرفی شده است. برای طراحی این جاذب از خواص الکترومغناطیسی مواد نانوکامپوزیتی ارائه شده در دیگر مقالات، استفاده شده است. محاسبات میزان جذب در ساختار جاذب ارائه شده بر اساس روش تحلیلی خط انتقال (TLM) انجام شده است. همچنین در روند طراحی انجام شده، به منظور بهبود عملکرد ساختار جاذب ارائه شده، تعیین مواد، ضخامت هر لایه و ترتیب چینش در ساختار کلی جاذب چند لایه بر اساس توابع هدف و محدودیت‌های اعمالی توسط روش‌های بهینه‌سازی NSGA-II و MLPSO انجام شده است. در هر دو روش بهینه‌سازی توابع هدف، حداکثر متوسط جذب در تمام فرکانس‌ها، داشتن بیشترین پهنای باند جذبی و داشتن کمترین ضخامت در نظر گرفته شده است. همچنین قیدهای اعمال شده در این طراحی عبارتند از: تعداد کل لایه‌های قابل پیاده‌سازی برای ساختار جاذب، اعمال حداقل

- [15] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation* 6, (2002) 182-197.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] J.R. Liu, M. Itoh, T. Horikawa, K. Machida, S. Sugimoto, T. Maeda, Gigahertz range electromagnetic wave absorbers made of amorphouscarbon-based magnetic nanocomposites, *Journal of Applied Physics* 98, (2005) 054305-1-054305-7.
- [19] L. Lian, Y. Liu, L. Deng, α -Fe/Nd₂Fe₁₄B nanocomposites for electromagnetic-wave-absorber in GHz microwave frequencies, *Advanced Materials Research* 399-401, (2012) 1102-1106.
- [20] 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.
- [21] L.C. Folgueras, M.A. Alves, 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.
- [22] F. Meng, R. Zhao, Y. Zhan, Y. Lei, J. Zhong, and X. Liu, Preparation and microwave absorption properties of Fe-phthalocyanine oligomer/Fe₃O₄ hybrid microspheres, *Applied Surface Science* 257 (2011) 5000-5006
- [5] K. Sakai, Y. Wada, 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.
- [6] E. Sanoa, E. Akiba, Electromagnetic absorbing materials using nonwoven fabrics coated with multi-walled carbon nanotubes, *Carbon* 78, (2014) 463-468.
- [7] J.L. Yong, L.X. Yin, 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.
- [8] D.J. Krusienski, 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] M.A. Moghimi, K.J. Craig, J.P. Meyer, Optimization of a trapezoidal cavity absorber for the linear Fresnel reflector, *Solar Energy* 119, (2015) 343-361.
- [10] N. Lassouaoui, H.H. Ouslimani, A. Priou, Genetic algorithms for automated design of the multilayer absorbers in the X-band and incident angle range, *Proceeding in Electromagnetics Research Symposium*, (2008) 509-513.
- [11] D.M. Pozar, Microwave engineering, John Wiley, New York, (2005).
- [12] S. Chamaani, S.A. Mirtaheri, 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.
- [13] D. Micheli, R. Pastore, M. Marchetti, Modeling of Radar absorbing materials using winning particle on electrically conductive Nanostructured composite material, *International journal of Material Science* 2, (2012) 31-38.
- [14] S.S. Orgaz, M. Pedemonte, P. Ezzatti, P.L. C. Risso, A. Medinad, A.C. Hernandez, Multi-objective optimization of a multi-step solar-driven Brayton plant, *Energy Conversion and Management* 99, (2015) 346-358.