

شبیه‌سازی ساختار نانومواد جاذب میکروویو به منظور کاهش سطح مقطع راداری (RCS) هواپیما

چراغی، اکبر^{*}، ملک فر، رسول^۲، احمدی زاده، بداله^۳، مومن بالله، صمد^۴

۱- هیات علمی دانشگاه شهید ستاری

۲- هیات علمی دانشگاه تربیت مدرس

۳- هیات علمی دانشگاه شهید ستاری

۴- عضو هیات علمی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۱)

چکیده

در این مقاله عملکرد موادی با داشتن ویژگی‌های ضریب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مختلط که در محدوده فرکانس رادار دارای جذب مناسبی هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در این مقاله یک الگوریتم ازدحامی جدید با نام الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO) برای حل مسئله نانو مواد جاذب راداری (RANM) پیشنهاد شده است. در الگوریتم ازدحامی پیشنهاد شده اعضاء جمعیت با تقلید از همدیگر مکان‌های جدید و بهتر را مورد پیمایش قرار می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در این مقاله دارای خروجی با کیفیت بالا می‌باشد و می‌تواند در کاربردهای گوناگون بکار گرفته شود. با توجه به قابلیت برنامه در انتخاب اولویت لایه‌ها، ترتیب لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، محدوده فرکانسی و زاویه‌های فرودی، بررسی‌های مختلفی صورت پذیرفت. از طرفی تلفات انعکاس در محدوده فرکانسی میکروویو با زاویه‌های مختلف به عنوان گزینه دیگری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بعلاوه با این ابزار می‌توان در مورد تلفات انعکاسی با قطبش‌پذیری مغناطیسی و الکتریکی نیز تحلیل‌هایی را به انجام رساند.

واژه‌های کلیدی: نانو مواد جاذب راداری، ناحیه امواج میکروویو، الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور، ضریب بازتاب، تلفات انعکاس

Modeling of Multi-layer Microwave Absorber Structures for Radar Cross Section

Akbar Cheraghi, Rasol Malekfar, Yadolah Ahmadizadeh, Samad Momenbelah

Abstract

In this paper, radar absorbent materials with complex permittivity and permeability coefficients are studied. A novel swarm algorithm called Imitation-base Swarm Optimization is proposed to solve the Radar Absorbent Nano-Material problems. It is suggested that each individual in the swarm explores the search space for better positions. It is shown that our proposed method gives better and high quality results and numerous applications are foreseeable for it. The program is capable of arranging and prioritizing the layers. It can choose the optimum layer thickness and do the modeling for different frequency and incidence angles. Reflection losses are analyzed at the microwave range for different angles. This code can also be used for the case of both the electric and magnetic polarizations.

Key words: radar absorbent materials, permittivity coefficient, permeability coefficient, modeling

مقدمه

جذب امواج الکترومغناطیسی در ناحیه مایکروویو، دارای اهمیت بسیار بالایی در بسیاری از زمینه‌های فناوری‌های نوین می‌باشد. سرعت گسترش انواع متنوعی از ابزارهای الکترونیکی بی‌سیم نیازمند دانش وسیعی از تداخل امواج الکترومغناطیسی و موادی است که پوشش محافظ اتربخش و کم هزینه‌ای از تابش‌های ناخواسته فراهم می‌کند. در مهندسی هوافضا، توسعه و پیشرفت جاذب‌های مایکروویو کم وزن در ناحیه وسیعی از بسامدها، بخش اساسی فناوری جذب امواج الکترومغناطیسی می‌باشد که برای به حداقل رساندن بازتاب امواج میکروویو از سطح اجسام پرنده مانند هواپیما استفاده می‌شود. مواد در مقیاس نانو به دلیل داشتن خواص مکانیکی و الکتریکی یکتا، گزینه بسیار مناسبی برای جاذب‌های الکترومغناطیسی می‌باشند. ترکیبات برپایه عناصر نانومقیاس می‌توانند کم وزن، ارزان، آسان در ساخت و لایه نشانی باشند [۱].

در جهان امروز فناوری‌های بر پایه تابش امواج الکترومغناطیسی که یکی از بنیادی‌ترین پدیده‌ها در طبیعت می‌باشد، به شدت مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. تداخل الکترومغناطیسی، اختلالی است که به هنگام ارسال سیگنال به یک هدف به وجود می‌آید و این اختلال به شکل ظاهری هدف، سختی و نرمی سطح هدف و طول موج سیگنال تابشی بستگی دارد. لذا سطح ممکن است با یک طول موج سخت و با یک طول موج دیگر نرم نشان داده شود.

از طرفی ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی منجر به اتلاف تابش می‌گردد [۳]. با وجود میلیون‌ها وسایل الکترونیکی شخصی در کاربری‌های امروزی، محافظت این ابزارها از تداخل‌های ناخواسته در محدوده وسیعی از بسامدهای الکترومغناطیسی ضروری می‌باشد. علاوه بر این، پیشروی به سمت مقیاس‌های پایین‌تر نیاز است تا مواد محافظ نازک، سبک وزن، آسان در ساخت و کم هزینه ساخته شود.

با توجه به اینکه ترکیب مواد مختلف می‌تواند دارای اتلاف الکتریکی و مغناطیسی مختلفی باشد و در عمل با جاذب‌های الکترومغناطیسی با اتلاف الکتریکی و مغناطیسی مختلط روبرو خواهد شد، لذا می‌بایستی برای این‌گونه ترکیبات متنوع از ساز و کارهای اتلافی جدیدی استفاده شود. بنابراین توجه به اثرات جذب تجمعی این‌گونه ترکیبات که برای توصیف عملکرد مواد جاذب الکترومغناطیسی با در نظر گرفتن امپدانس موج،

امپدانس ذاتی لایه‌ها، قطبش‌پذیری موج فرودی، زاویه تابش، محدوده فرکانسی، اولویت لایه‌ها و ضخامت لایه ضروری است. برای یک ساختار مسطح چندلایه‌ای میزان ضریب بازتابندگی با قطبش‌پذیری الکتریکی و مغناطیسی به صورت روابط (۱) و (۲) تعریف می‌گردد [۴].

$$RC^{TM/TE} = \frac{Z_i^{TM/TE} - Z_0^{TM/TE}}{Z_i^{TM/TE} + Z_0^{TM/TE}} \quad (1)$$

$$RC_{dB}^{TM/TE} = 20 \log_{10} \frac{Z_i^{TM/TE} - Z_0^{TM/TE}}{Z_i^{TM/TE} + Z_0^{TM/TE}} \quad (2)$$

که در آن $Z_0^{TM/TE}$ و $Z_i^{TM/TE}$ بترتیب امپدانس فضای آزاد و لایه i ام می‌باشد.

$$Z_0^{TM/TE} \cong 377 \Omega \quad (3)$$

از طرفی $Z_i^{TM/TE}$ به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد:

$$Z_i^{TM/TE} = \eta_x^{TM/TE} \frac{Z_{ix-1}^{TM/TE} \cos(k_x t_x) + j \eta_x^{TM/TE} \sin(k_x t_x)}{\eta_x^{TM/TE} \cos(k_x t_x) + j Z_{ix-1}^{TM/TE} \sin(k_x t_x)} \quad (4)$$

که در آن $\eta_x^{TM/TE}$ امپدانس ذاتی لایه x ام، k_x ، عدد موج لایه x ام، t_x ضخامت لایه x ام می‌باشد. از طرفی ضریب گذردهی الکتریکی مختلط و ضریب نفوذپذیری مختلط مواد و رابطه آنها با عدد موج، امپدانس ذاتی دو حالت مختلف پلاریزاسیون و زاویه فرودی لایه x ام به صورت روابط (۵) تا (۱۰) تعریف می‌گردد [۴]:

$$\epsilon_{rx} = \epsilon'_{rx} - j \epsilon''_{rx} \quad (5)$$

$$\mu_{rx} = \mu'_{rx} - j \mu''_{rx} \quad (6)$$

$$k_x^2 = (2\pi f)^2 \epsilon_0 \mu_0 (\epsilon'_{rx} - j \epsilon''_{rx}) (\mu'_{rx} - j \mu''_{rx}) \quad (7)$$

$$\eta_x^{TM} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu'_{rx} - j \mu''_{rx}}{\epsilon'_{rx} - j \epsilon''_{rx}}} \cos \theta_x \quad (8)$$

$$\eta_x^{TE} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu'_{rx} - j \mu''_{rx}}{\epsilon'_{rx} - j \epsilon''_{rx}}} \frac{1}{\cos \theta_x} \quad (9)$$

$$\theta_x = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\epsilon'_{rx} + 1} \sin \theta_{x+1}}{\sqrt{\epsilon'_{rx}}} \right) \quad (10)$$

در روند اجرایی اندازه‌گیری جذب امواج الکترومغناطیسی با استفاده از موادی سبک وزن، نازک و ساختارهای چندلایه‌ای نیاز به یک الگوریتم به نام ISO-RANM ضروری است.

طراحی الکترومغناطیسی استفاده می‌گردد. با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا (Java) می‌توان روش‌های بهینه‌سازی مختلفی را برای طراحی مواد جاذب ترکیبی استفاده کرد. این گونه نرم‌افزارها می‌توانند با استفاده از الگوریتم مناسب، خواص الکتریکی، خواص مغناطیسی و ضخامت لایه‌ها را بهینه‌سازی کنند [۵].

روش پیشنهادی

این بخش شامل سه زیربخش می‌باشد. اولین زیربخش مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) می‌باشد. دومین زیربخش به الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO) مرتبط است و آخرین زیربخش نیز طریقه حل مسئله نانو مواد جاذب راداری (RANM) را با استفاده از الگوریتم طراحی شده جدید تشریح می‌کند [۶]. یکی از مزیت‌های مهم الگوریتم ISO، قابلیت مقابله بطور همزمان با فضاهای گسسته و پیوسته می‌باشد. این توانایی در زیربخش دوم شرح داده می‌شود.

زیربخش اول: الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)

طریقه غذاییایی پرندگان توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO قابل شبیه‌سازی است. فرض کنید فقط یک تکه غذا در محیط وجود دارد و یک مجموعه از پرندگان به دنبال آن می‌گردند. در هر تکرار جستجو، پرندگان می‌دانند که چقدر غذا از موقعیت آنها دور می‌باشد، ولی دقیقاً مکان آن غذا را نمی‌دانند. بهترین رهیافت برای رسیدن به غذا این است که از نزدیکترین پرندگان به غذا تقلید کنند تا به غذا نزدیکتر شوند. الگوریتم بهینه‌سازی PSO از این راه کار پرندگان استفاده می‌کنند تا مسائل بهینه‌سازی را حل کنند. در الگوریتم بهینه‌سازی PSO، هر عضو بنام یک ذره شناخته می‌شود. همه ذره‌ها یک مقدار برازش دارند که کیفیت آن ذره را نشان می‌دهند و همین‌طور دارای یک مقدار سرعت می‌باشند که جهت مهاجرت ذره‌ها را نشان می‌دهد. ذره‌ها فضای جستجوی مسئله را با پیروی از دیگر پرندگان با برازش بیشتر مورد پیمایش قرار می‌دهند [۷]. الگوریتم بهینه‌سازی PSO با جمعیتی از ذره‌های تصادفی، مقداره‌ی اولیه می‌شود و فضای جستجو را با تولید نسل‌های جدید جمعیت، مورد پیمایش قرار می‌دهد. در هر

نانومواد جاذب راداری (Radar Absorption Nano Material) گزینه مناسبی برای جاذب‌های چندلایه‌ای هستند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO) یا Imitation Based Optimization Algorithm می‌توان به بررسی تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، اولویت لایه‌ها و مواد ترکیبی هر لایه دست یافت. لذا پیاده‌سازی مجموعه جامع عملگرهای رایانه‌ای برای ورود پارامترهای فیزیکی ساختار ترکیبی مواد موجود، به منظور محاسبه میزان بازتابندگی با اولویت‌های خواسته شده، از اهداف این مقاله به شمار می‌رود. در این مقاله به بررسی عملکرد ۱۰۹ نوع ترکیب مواد، با داشتن ویژگی‌های ضریب گذردهی الکتریکی مختلط و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مختلط در محدوده فرکانسی ۱ الی ۱۲ گیگاهرتز خواهیم پرداخت. ترکیب مواد تشکیل‌دهنده این ماده مطابق ضمیمه (۱) از کامپوزیت‌های پلیمری رسانا و نارسانا، فریت‌ها و هگزافریت‌ها و خانواده‌های کربنی می‌باشد. بعضی از این ترکیبات دارای مقدار ثابتی از ضرایب گذردهی الکتریکی مختلط و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مختلط نبوده و در نتیجه محدوده‌ای از مقادیر مینیمم و ماکزیمم برای آنها لحاظ گردیده است.

کارهای مرتبط

مسئله اصلی در طراحی جاذب‌های میکروویو مسطح، به حداقل رساندن ضریب بازتاب از یک موج فرودی در یک ساختار چند لایه‌ای برای محدوده مشخصی از زوایا و فرکانس‌ها می‌باشد. ضریب انعکاس به ضخامت هر لایه، خواص الکتریکی و خواص مغناطیسی هر لایه وابسته است. به حداقل رساندن ضریب بازتاب یک مسئله بهینه‌سازی چندمنظوره است و مطالعات گوناگونی در این زمینه قابل انجام است. با طراحی یک مدل جاذب چندلایه‌ای می‌توان کنترلی در سنتز و ترکیب مواد، ثابت دی الکتریک، رسانندگی، ضخامت لایه‌ها و بهینه‌سازی تعداد لایه‌ها بوجود آورد.

الگوریتم‌های تکاملی به مانند الگوریتم ژنتیک در بسیاری از موارد در جاذب‌ها استفاده شده‌اند. روش جدیدی در پوشش چندلایه‌ای به نام بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) به عنوان یک روش و الگوی جهانی مطرح است. این روش تکوینی بر اساس پرواز پرند الگوبرداری شده است. الگوریتم PSO به آسانی برای بهینه‌سازی، بهره‌وری محاسباتی و مسائل مربوط به

همزمان این کار را انجام می‌دهد. در الگوریتم ISO بجای استفاده از واژه ذره از واژه عضو استفاده می‌شود. الگوریتم ISO در فضای جستجو شبیه الگوریتم PSO بوده و با مقداری نوآوری کار می‌کند و همچنین در فضای گسسته یک رهیافت خاص خود را دنبال می‌کند. در الگوریتم ISO اعضا با تقلید از همدیگر به سمت مکان‌های بهتر حرکت می‌کنند. این تقلید هم در ابعاد گسسته و هم در ابعاد پیوسته صورت می‌گیرد. شبه کد مربوط به الگوریتم ISO در شکل ۱ آورده شده است.

شبه کد ISO

pseudo code of the ISO procedure:

For each individuals in population

Initialize individuals with random way

END

Do

For each individuals in population

Calculate fitness value by equation (15)

If the current individual is better than the Previous pBest in history
set current location of the individual as a new pBest

End

determine best individuals within current population as a new gBest

For each individuals

Calculate individuals velocity according equation (13)

Update individuals position according equation (14)

End

While maximum iterations is not attained

equation (13):

if $\text{rand}() < P_{\text{rand}}$ then

$$v_m^k(t+1) = \text{rand} \left(\begin{matrix} \max \\ \text{velocity} \end{matrix}, - \begin{matrix} \max \\ \text{velocity} \end{matrix} \right)$$

else

$v_m^k(t+1)$ is determined by equation 13

equation (14):

if the dimension is continuous then

$x_m^k(t+1)$ is determined by equation 12

else

$x_m^k(t+1) = x1 \text{ or } x2 \text{ or } x3 \text{ or } x4$

equation (15):

$$\text{Fitness of individual} = \sum_{\text{freq}=\text{fmin}}^{\text{freq}=\text{fmax}} (\sum_{\theta=\theta_{\text{min}}}^{\theta=\theta_{\text{max}}} RC_{TM}(\text{freq}, \theta) + RC_{TE}(\text{freq}, \theta))$$

شکل ۱ - شبه کد ISO

برازش هر عضو برابر حاصل جمع مقادیر RLTM ها و RLTE ها در محدوده‌های فرکانسی و زاویه‌ای از پیش تعریف شده می‌باشد که با فرمول (۱۵) در شکل ۱ نشان داده شده است.

f_{max} نشان دهنده حداکثر فرکانس و f_{min} نشان دهنده حداقل فرکانس می‌باشد. همینطور θ_{max} نشان دهنده حداکثر زاویه تابش و θ_{min} حداقل زاویه تابش را مشخص می‌سازد. حاصل جمع مقادیر RLTM ها و RLTE ها در محدوده‌ها را به عنوان برازش در نظر گرفته شده است.

تولید نسل، ذره‌ها با توجه به، دو بهترین مکان، بروزسانی می‌شوند:

- اولین بهترین مکان، از لحاظ برازش، مکانی است که خود ذره تا به الان پیدا کرده است که با نام p_{Best} شناخته می‌شود.
- دومین بهترین مکان، بهترین مکانی است که در جمعیت جاری وجود دارد که با نام g_{Best} شناخته می‌شود و در تولید نسل جدید به آن توجه می‌شود.

با روابط (۱۱) و (۱۲)، ذرات هنگام تولید نسل جدید، مقدار سرعت و مکان خود را بروزسانی می‌کنند.

$$x_m^k(t+1) = x_m^k(t) + v_m^k(t+1)\Delta t \quad (11)$$

$$v_m^k(t+1) = W_inertia(t)v_m^k(t) + C_1(t).r_1(t).[P_{\text{best},m}^k(t) - x_m^k(t)] + C_2(t).r_2(t).[G_{\text{best},m}^{(t)} - x_m^k(t)] \quad (12)$$

x_m^k مکان k امین ذره را در بعد m ام نشان می‌دهد. v_m^k سرعت k امین ذره را در بعد m ام نشان می‌دهد. $W_inertia$ همان وزن اینرسی می‌باشد که مقداری بین صفر تا ۱ را به خود اختصاص می‌دهد. C_1, C_2 فاکتورهای آموزشی می‌باشند که معمولاً با عدد ۲ مقدار دهی می‌کنند. r_1, r_2 دو مقدار تصادفی بین صفر و ۱ و t فاکتور زمان می‌باشند [۸].

زیربخش دوم: الگوریتم بهینه‌سازی تقلیدمحور (ISO)

یکی از مهمترین مسائل در طراحی الگوریتم بهینه‌سازی، توجه کردن به قابلیت پیمایش و ارتفاع می‌باشد. قابلیت پیمایش، الگوریتم را قادر می‌کند تا در سطح فضای جستجو به تدریج جستجو کند و قابلیت ارتفاع، الگوریتم را قادر می‌سازد تا عمق فضای جستجو را با دقت بیشتری بررسی کند. داشتن هر دو قابلیت در حد بالا، کار مشکلی است؛ چراکه افزایش در یکی از قابلیت‌ها باعث کاهش در قابلیت دیگر می‌شود. بیشتر الگوریتم‌ها هر دو قابلیت را ندارند و برای فضاهای جستجوی خاصی طراحی شده‌اند، ولی الگوریتم بهینه‌سازی ISO، توانایی بالایی برای مصالحه بین این قابلیت‌ها، با استفاده از پارامترهای ورودی دارد تا بتوان از آن در فضاهای جستجو با ویژگی‌های متفاوت استفاده کرد. در واقع این کاربر است که بنا به شناختش از فضای جستجو مقدار اهمیت این دو قابلیت را برای الگوریتم مشخص می‌سازد. همانطور که قبلاً ذکر شد، توانایی مقابله با فضای جستجوی گسسته و پیوسته یکی از مسائل مهم الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌باشد که الگوریتم بهینه‌سازی ISO

ستون‌ها نشان دهنده خصوصیات ساختار نانومواد جاذب راداری (RANM) می‌باشد. هر لایه دارای دو بعد است: اولی نام ماده استفاده شده در همان لایه را نشان می‌دهد و دومی نشان دهنده ضخامت آن ماده در لایه مربوطه است. تعداد لایه‌ها برای عضو (ساختار RANM) با m تعیین می‌شود و تعداد کل اعضاء در جمعیت (تعداد ساختار RANM) با K نشان داده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی ISO با استفاده از روابط مذکور در بالا به تعداد حداکثر نسل (max-generation)، نسل جدید تولید می‌کند. این بدان معنی است که ما به تعداد max-generation بار از جدول ۱ به تعداد جمعیت را تولید می‌کنیم که در هر بار تولید، اعضا سعی می‌کنند تا برازش خود را بیشتر کنند. در نهایت gBest نسل نهایی به عنوان نتیجه نهایی به کاربر نشان داده می‌شود.

جدول ۱- افراد جمعیت در نسل i ام

		لایه ۱	لایه ۲	لایه m	لایه m
شاخص ۱	موقعیت	S_1	t_1	S_2	t_2	...	S_m t_m
		L_{best}	LS_1	Lt_1	LS_2	Lt_2	...
شاخص ۲	موقعیت	S_1	t_1	S_2	t_2	...	S_m t_m
		L_{best}	LS_1	Lt_1	LS_2	Lt_2	...
...							
شاخص k	موقعیت	S_1	t_1	S_2	t_2	...	S_m t_m
		L_{best}	LS_1	Lt_1	LS_2	Lt_2	...

نتایج شبیه‌سازی

به طور کلی ابزار پیاده‌سازی شده شامل چهار منوی اصلی می‌باشد. در منوی شکل ۲-۱ پارامترهای مربوط به تعداد لایه‌ها، تعداد مواد، انتخاب حداقل یا حداکثر ضرایب گذردهی الکتریکی و ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی، محدوده فرکانسی، محدوده زاویه فرودی و محدوده ضخامتی لایه‌ها نمایش داده می‌شود. در منوی شکل ۲-۲ پارامترها و ثابت‌های مربوط به الگوریتم ISO قرار داده می‌شود.

P_{rand} در روابط شکل ۱، نرخ سرعت تصادفی و $\max_{velocity}$ ماکزیمم مقدار سرعت را مشخص می‌کنند. x_1 مکان جاری، x_2 عدد گسسته تصادفی جدید، x_3 مکان عضو را در P_{Best} مشخص می‌کند و x_4 مکان عضوی از جمعیت است که با روند مسابقه‌ای انتخاب شده است. تعداد اعضایی که در مسابقه شرکت می‌کنند با پارامتر $Num\ of\ Tournament$ مشخص می‌شود به شکلی که این تعداد اعضا بطور تصادفی انتخاب می‌شوند و بعد از آن، روند مسابقه‌ای بهترین عضوی که برازش آن بیشتر است را به عنوان برنده در x_4 قرار می‌دهد. هر کدام از x_1, x_2, x_3 و x_4 نرخ خاص خودش (w_1, w_2, w_3 و w_4) که پارامترهای ورودی می‌باشند) را دارند و مجموع مقادیر این چهار پارامتر برابر ۱ می‌باشد.

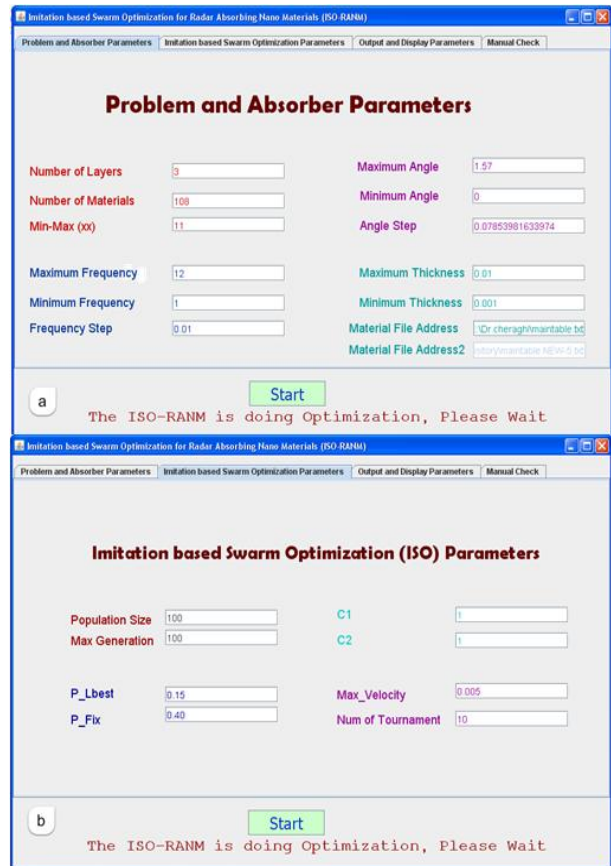
r_1, r_2, r_3 و P_{rand} را می‌توان پارامترهای قابلیت پیمایش نامید و با افزایش مقادیر آنها، قابلیت جستجوی الگوریتم نیز افزایش می‌یابد و برعکس، پارامترهای C_1, C_2, C_3, C_4 و $W_{inertia}$ را نیز پارامترهای قابلیت ارتفاع می‌توان نامید که با افزایش مقادیر آنها، منجر به افزایش قابلیت ارتفاع الگوریتم می‌شود و برعکس. در مورد همگرایی، پارامترهای قابلیت ارتفاع تاثیر مستقیم می‌گذارند و هر چه قابلیت ارتفاع بیشتر گردد، همگرایی سریعتر صورت می‌گیرد و هر چه قدر قابلیت جستجو و پیمایش افزایش یابد، قابلیت همگرایی پایین می‌آید. رسیدن به نقطه بهینه سراسری باید به گونه‌ای باشد که الگوریتم به نقطه بهینه سراسری نزدیکتر شود و قابلیت واگرایی الگوریتم باعث می‌شود تا الگوریتم از بهینه محلی فرار کند. با رابطه ۱۴، الگوریتم ISO قادر خواهد بود که با فضای گسسته نیز کار کند.

زیربخش سوم: مدل‌سازی نانومواد جاذب راداری با الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO-RANM)

برای مدل‌سازی و حل مسئله نانومواد جاذب راداری با الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO-RANM) یک نمای کلی در این مقاله ارائه شده است که در جدول ۱ نشان داده می‌شود. جدول ۱ اعضای جمعیت را در نسل i ام نشان می‌دهد. هر سطر در جدول مربوطه نشان دهنده یک عضو جمعیت است که دارای دو موقعیت جاری و موقعیت L_{Best} (بهترین موقعیتی که توسط خود عضو دیده شده است) می‌باشد.



شکل ۳- a: پارامترهای مد نظر برای نمایش خروجی، b: ورود اطلاعات از طریق کاربر



شکل ۲- a: پارامترهای اولیه جاذب‌ها، b: پارامترها و ثابت‌های مربوط به الگوریتم ISO

جدول ۲- عملکرد یک ساختار ۷ لایه‌ای با ضخامت تقریبی ۷ میلی‌متر

نوع لایه	شاخص	Material Type	t(mm)
لایه ۶	ID=85	CIP/GRP composites	t=3.13
لایه ۵	ID=31	E.R+MWCNT7	t=1.0
لایه ۴	ID=105	Graphene	t=1.0
لایه ۳	ID=104	RAM+45% Carbonyliron	t=1.0
لایه ۲	ID=93	Fe ₉₁ Si ₉ Powders(FSP)	t=1.0
لایه ۱	ID=109	Ba _(1-x) La _x Fe ₁₂ O ₁₉	t=1.0
لایه ۰	ID=1	F50%+PU100%	t=1.0

میزان ضریب بازتابندگی با پلاریزاسیون TE و TM در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۲ گیگاهرتز و زوایای صفر تا ۹۰ درجه نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۴- a مشاهده می‌گردد، حداکثر میزان تلفات انعکاس با پلاریزاسیون TE در حدود -32dB در فرکانس 9GHz (در زاویه 0°) می‌باشد. از طرفی در شکل ۴- b مشاهده می‌گردد، حداکثر میزان تلفات انعکاس با

در منوی شکل ۳- a پارامترهای مد نظر برای نمایش خروجی به مانند محدوده فرکانسی و محدوده زاویه‌ای در نظر گرفته می‌شود، این مقادیر با سعی و خطا بدست آمده‌اند و فقط برای این مسئله استفاده می‌شوند. لذا اگر ماده‌ها عوض شوند، دوباره باید این پارامترها میزان‌سازی گردند. برای میزان‌سازی با سعی و خطا نیز مجموعه‌ای از پارامترها تعریف می‌گردد و به ازای هر کدام از آنها الگوریتم چند بار اجرا می‌شود و بهترین پارامتر گزینش می‌شود. در منوی شکل ۳- b ورود اطلاعات از طریق کاربر انجام می‌شود. این اطلاعات شامل تعداد لایه‌ها، نوع ماده و ضخامت پیشنهادی است. در این منو، قابلیت بهینه‌سازی دستی از مجموع عملکرد خروجی منوی سوم نیز وجود دارد.

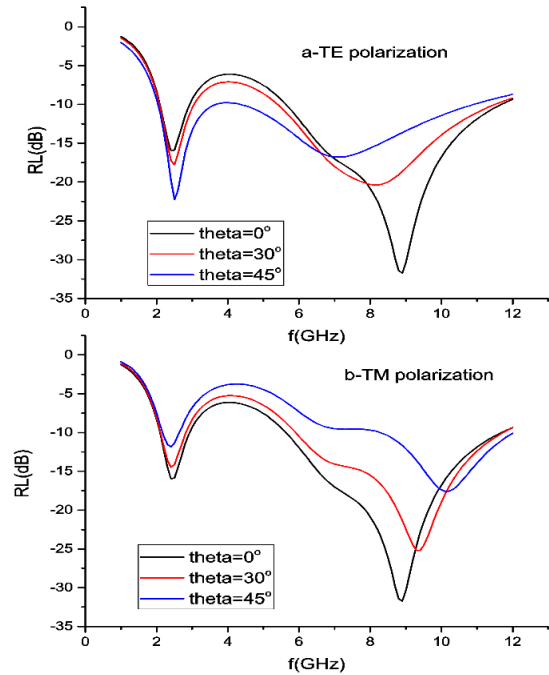
در این مرحله از کار با داشتن مجموعه‌ای از ترکیب مواد می‌توان خروجی‌های مختلفی را مشاهده کرد. عملکرد یک ساختار ۷ لایه‌ای با ضخامت تقریبی ۷ میلی‌متر به صورت جدول ۲ آورده شده است.

بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) به عنوان یک روش و الگوی مناسب جهانی مطرح است. با پیاده‌سازی الگوریتم ISO اهدافی از جمله میزان تلفات انعکاس با پلاریزاسیون مختلف، تعداد لایه‌ها، ضخامت مد نظر، زوایای مختلف موج فرودی و اولویت قرارگیری لایه‌ها به دست می‌آیند. با بررسی عملکرد مواد مختلف در کاهش بازتابندگی در محدوده امواج میکروویو و با بهره‌گیری از کارهای انجام شده با ترکیبات کامپوزیتی، کربونیل آیرونی، نانو لوله‌های کربنی مختلف و فریت‌ها یک کتابخانه مرجع از مواد ترکیبی به دست آمده است. این مواد با داشتن ضرایب گذردهی و نفوذپذیری مختلف به طراحی برنامه کمک کرده و با استفاده از این ترکیبات می‌توان به بهینه‌سازی لایه‌ها با خواسته‌های فوق جامه عمل پوشاند. معادلات مربوط به تلفات انعکاس با پلاریزاسیون TE و TM، زوایای فرودی، ضرایب گذردهی و نفوذپذیری مختلف، فرکانس تابشی و ضخامت برای این برنامه مطابق فوق نوشته شده است. با داشتن خروجی برنامه به صورت چندلایه‌ای می‌توان یک الگوی جدیدی به فیزیکدانان عرصه فناوری جذب امواج الکترومغناطیسی در جهت انتخاب مواد، ترکیب مواد، سنتز، لایه‌نشانی و در نهایت مقایسه روند اجرایی کار از دیدگاه شبیه‌سازی و آزمایشگاهی پیشنهاد کرد.

منابع و مراجع

- [1] F. Qin and C. Brosseau, "A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles," J. Appl. Phys., vol. 111, no. 6, p. 061301, 2012.
- [2] F. Wen, F. Zhang, J. Xiang, W. Hu, S. Yuan, and Z. Liu, "Microwave absorption properties of multiwalled carbon nanotube/FeNi nanopowders as light-weight microwave absorbers," J. Magn. Mater., vol. 343, pp. 281–285, 2013.
- [3] Z. Liu, G. Bai, Y. Huang, F. Li, Y. Ma, T. Guo, X. He, X. Lin, H. Gao, and Y. Chen, "Microwave Absorption of Single-Walled Carbon Nanotubes / Soluble Cross-Linked Polyurethane Composites," J. Phys. Chem., pp. 13696–13700, 2007.

پلاریزاسیون TM در حدود -32dB در فرکانس 9GHz (در زاویه 0°) می‌باشد.



شکل ۴- ضریب بازتاب در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۲ گیگاهرتز در سه زاویه: a- ضریب بازتاب با پلاریزاسیون TE و b- پلاریزاسیون TM

نتیجه‌گیری

در طراحی جاذب‌های میکروویو چند لایه‌ای، به حداقل رساندن ضریب بازتاب از یک موج فرودی در یک ساختار برای محدوده مشخصی از زوایا و فرکانس‌ها مهم می‌باشد. تلفات انعکاس به ضخامت هر لایه، خواص الکتریکی و خواص مغناطیسی هر لایه، اولویت لایه‌ها و میزان ضخامت کل وابسته است. به حداقل رساندن بازتابندگی نیازمند یک الگوریتم بهینه‌سازی چندمنظوره است و مطالعات گوناگونی در این زمینه قابل انجام است. با طراحی یک مدل جاذب چندلایه‌ای می‌توان کنترلی در سنتز و ترکیب مواد، ثابت دی الکتریک، رسانندگی، ضخامت لایه‌ها و بهینه‌سازی تعداد لایه‌ها بوجود آورد.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقلید محور (ISO) به عنوان یک الگوریتم پیشنهادی جهت برآورده شدن خواسته‌های فوق طراحی شده است. این الگوریتم الهام گرفته از الگوریتم

- [4] D. Micheli, C. Apollo, R. Pastore, R. Bueno Morles, S. Laurenzi, and M. Marchetti, "Nanostructured composite materials for electromagnetic interference shielding applications," *Acta Astronaut.*, vol. 69, no. 9–10, pp. 747–757, 2011.
- [5] I. Amaya, R. Correa, "Optimal Design of Multilayer EMAs for Frequencies between 0.85 GHz and 5.4 GHz," *SECCION TECNICA*, pp. 33–37, 2013.
- [6] M. Asi and N. Dib, "Design Of Multilayer Microwave Broadband Absorbers Using Central Force Optimization," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 26, no. September, pp. 101–113, 2010.
- [7] S. Chamaani, S. a Mirtaheri, M. Teshnehlab, M. a Shoorehdeli, and V. Seydi, "Optimization for electromagnetic absorber design," *Technology*, vol. 79, pp. 353–366, 2008.
- [8] D. Micheli, R. Pastore, G. Gradoni, V. Mariani Primiani, F. Moglie, and M. Marchetti, "Reduction of satellite electromagnetic scattering by carbon nanostructured multilayers," *Acta Astronaut.*, vol. 88, pp. 61–73, 2013.
- [9] S. M. Abbas, A. K. Dixit, R. Chatterjee, and T. C. Goel, "Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-polymer composites," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 309, no. 1, pp. 20–24, 2007.
- [10] Q. Liu, B. Cao, C. Feng, W. Zhang, S. Zhu, and D. Zhang, "High permittivity and microwave absorption of porous graphitic carbons encapsulating Fe nanoparticles," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 13, pp. 1632–1636, 2012.
- [11] Z. Liu, G. Bai, Y. Huang, Y. Ma, F. Du, F. Li, T. Guo, and Y. Chen, "Reflection and absorption contributions to the electromagnetic interference shielding of single-walled carbon nanotube/polyurethane composites," *Carbon N. Y.*, vol. 45, no. 4, pp. 821–827, 2007.
- [12] R. C. Che, L.-M. Peng, X. F. Duan, Q. Chen, and X. L. Liang, "Microwave Absorption Enhancement and Complex Permittivity and Permeability of Fe Encapsulated within Carbon Nanotubes," *Adv. Mater.*, vol. 16, no. 5, pp. 401–405, 2004.
- [13] 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," *Sci. Rep.*, vol. 4, pp. 1–7, 2014.
- [14] Z. Wang and G.-L. Zhao, "Microwave Absorption Properties of Carbon Nanotubes-Epoxy Composites in a Frequency Range of 2 - 20 GHz," *Open J. Compos. Mater.*, vol. 03, no. 02, pp. 17–23, 2013.
- [15] D. Micheli, C. Apollo, R. Pastore, and M. Marchetti, "X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 2, pp. 400–409, 2010.
- [16] A. Sharma and M. N. Afsar, "Microwave complex permeability and permittivity of nanoferrites," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, p. 07A503, 2011.
- [17] G. Tong, F. Liu, W. Wu, F. Du, and J. Guan, "Rambutan-like Ni/MWCNT heterostructures: Easy synthesis, formation mechanism, and controlled static magnetic and microwave electromagnetic characteristics," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 20, p. 7373, 2014.
- [18] X.-C. Yang, R.-J. Liu, X.-Q. Shen, F.-Z. Song, M.-X. Jing, and X.-F. Meng, "Enhancement of microwave absorption of nanocomposite BaFe₁₂O₁₉/α-Fe microfibers," *Chinese Phys. B*, vol. 22, no. 5, p. 058101, 2013.
- [19] N. Zinc, F. Pb, Z. Ti, A. Mandal, D. Ghosh, A. Malas, P. Pal, and C. K. Das, "Synthesis and Microwave Absorbing Properties of Cu-Doped," *Journal of Engineering*, vol. 2013, 2013.
- [20] J. Hongxia, L. Qiaoling, Y. Yun, G. Zhiwu, and Y. Xiaofeng, "Preparation and microwave adsorption properties of core-shell structured barium titanate/polyaniline composite," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 332, pp. 10–14, 2013.
- [21] Y. Tan, J. Tang, A. Deng, Q. Wu, T. Zhang, and H. Li, "Magnetic properties and microwave absorption properties of chlorosulfonated polyethylene matrices containing graphite and carbonyl-iron powder," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 326, pp. 41–44, 2013.
- [22] A. Kumar, V. Agarwala, and D. Singh, "Microwave absorbing behavior of metal dispersed TiO₂ nanocomposites," *Adv.*

- Powder Technol., vol. 25, no. 2, pp. 483–489, 2014.
- [23] J. Guo, Y. Duan, L. Liu, L. Chen, and S. Liu, "Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Carbonyl-Iron/Fe₉Si₉ Composites in Gigahertz Range," J. Electromagn. Anal. Appl., vol. 03, no. 05, pp. 140–146, 2011.
- [24] G. Z. Shen, G. S. Cheng, Y. Cao, and Z. Xu, "Preparation and microwave absorption of M type ferrite nanoparticle composites", Mater. Sci., vol. 28, no. 1, pp. 327–334, 2010.
- [25] P. Bhattacharya, "Microwave absorption behaviour of MWCNT based nanocomposites in X-band region", Express Polym. Lett., vol. 7, no. 3, pp. 212–223, 2013.
- [26] Y. Feng, T. Qiu, X. Li, and C. Shen, "Microwave absorption properties of the carbonyl iron/EPDM radar absorbing materials", J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed., vol. 22, no. 2, pp. 266–270, 2007.
- [27] C. K. Das, P. Bhattacharya, and S. S. Kalra, J., "Improvement in electromagnetic interference shielding effectiveness of cement composites using carbonaceous nano/micro inerts", Mater. Sci. Res., 1, 126–132, 2012.
- [28] C.-J. Li, B. Wang, and J.-N. Wang, J., "Self-Propagating Combustion Triggered Synthesis of 3D Lamellar Graphene/BaFe₁₂O₁₉ Composite and Its Electromagnetic Wave Absorption Properties", Magn. Mater., 324, 1305–1311, 2012.

ضمیمه ۱

Num.	Material Type	ϵ_1'	ϵ_2'	ϵ_1''	ϵ_2''	μ_1'	μ_2'	μ_1''	μ_2''	Reference
1	F 50% + PU 100%	5.4	5.4	0.15	2.2	1.22	1.08	0.05	0.08	[9]
2	F 60% + PU 100%	7.8	7.8	0.3	0.5	1.2	1.05	0.06	0.1	[9]
3	F 70% + PU 100%	9.5	9.5	0.4	0.5	1.29	1	0.08	0.11	[9]
4	F 80% + PU 100%	14.5	14.5	0.9	1.3	1.27	1.14	0.1	0.13	[9]
5	E.R + MWCNT 4.7%	6	5	1	2	1	1	0	0	[10]
6	E.R + MWCNT 11.4%	22	14	7	4	1	1	0	0	[10]
7	E.R + MWCNT 23.1%	160	5	200	10	1	1	0	0	[10]
8	E.R + MWCNT 25.9%	200	20	200	20	1	1	0	0	[10]
9	E.R + Fe + MWCNT 16.7%	35	24	90	42	1	1	0	0	[10]
10	PS + Fe + MWCNT 20%	30	25	0.9	0.6	1	1	0	0	[10]
11	PU + SWCNT 20%	37	30	26	24	1	1	0	0	[10]
12	P.U + SWCNT 5%	6	6	2	2	1	1	0	0	[11]
13	P.U + SWCNT 10%	18	19	10	12	1	1	0	0	[11]
14	P.U + SWCNT 15%	31	32	17	32	1	1	0	0	[11]
15	P.U + SWCNT 20%	32	38	23	27	1	1	0	0	[11]
16	E.R + CNT (20%)	20	31	20	50	0.01	0.01	0.01	0.01	[12]
17	E.R + CNT 10% + Fe 10% -B	20	34	47	58	0.8	1	0.03	0.03	[12]
18	E.R + CNF 10% + Fe 10% -C	26	35	30	70	0.8	1.1	0.03	0.03	[12]
19	E.R + CNT 10% + Fe 10% -D	27	32	48	55	1.7	2.1	1.4	1.7	[12]
20	E.R + CNF 10% + Fe 10% -E	28	33	45	92	1.9	2.3	1.4	1.9	[12]
21	PVC + MWCNT 0.8%	8	8.3	1.2	1.4	1.1	1.2	-0.1	0.1	[13]
22	PVC + ACNT 0.8%	5.5	5.6	0.8	0.9	1.2	1.3	0.11	0.14	[13]
23	PVC + La(NO ₃) ₃ 0.6% + ACNT 0.8%	5.8	7.5	1.8	3.5	1	1.6	0.17	0.3	[13]
24	Pure E.R	2.60	2.80	0.05	0.10	1.30	1.20	0.10	-0.05	[14]
25	E.R + MWCNT 1%	3.40	3.60	0.20	0.25	1.40	1.30	0.10	0.10	[14]
26	E.R + MWCNT 2%	3.50	3.50	0.18	0.22	1.40	1.40	0.10	0.10	[14]
27	E.R + MWCNT 3%	3.80	3.90	0.28	0.31	1.30	1.30	0.10	0.10	[14]
28	E.R + MWCNT 4%	5.20	5.30	0.40	0.60	1.40	1.30	0.10	0.10	[14]
29	E.R + MWCNT 5%	5.40	5.60	0.50	0.85	1.40	1.30	0.10	0.10	[14]
30	E.R + MWCNT 6%	6.60	6.80	0.60	1.20	1.40	1.20	0.10	0.10	[14]
31	E.R + MWCNT 7%	6.70	6.90	0.50	1.20	1.40	1.20	0.10	0.10	[14]
32	E.R + MWCNT 8%	7.40	7.50	0.60	1.50	1.40	1.30	0.10	0.10	[14]
33	E.R + MWCNT 9%	7.80	8.00	0.60	1.40	1.10	1.00	0.10	0.10	[14]
34	E.R + MWCNT 10%	7.90	8.30	0.80	1.90	1.40	1.10	0.10	0.10	[14]
35	Air	1	1	0	0	1	1	0	0	[8]
36	Teflon	2	2	0	0	1	1	0	0	[8]
37	E.R	2.8	2.8	0.1	0.1	1	1	0	0	[8]
38	E.R + MWCNT 0.5%	5.5	4	1.2	1.4	1	1	0	0	[8]
39	E.R + MWCNT 1%	7	5.7	1.5	1.8	1	1	0	0	[8]
40	E.R + MWCNT 1.5%	10	7	2.7	3.2	1	1	0	0	[8]
41	E.R	4	4	1	1	1	1	0	0	[4]
42	E.R + MWCNT 0.5%	4	7	2	3	1	1	0	0	[4]
43	E.R + MWCNT 1%	7	8	3	4	1	1	0	0	[4]
44	E.R + MWCNT 2%	9	12	4	7	1	1	0	0	[4]

45	E.R + MWCNT 2.5%	14	15	10	12	1	1	0	0	[4]
46	E.R + MWCNT 3%	17	18	14	15	1	1	0	0	[4]
47	E.R + MWCNT 4%	29	32	25	28	1	1	0	0	[4]
48	E.R + SWCNT 1%	3.8	4	0.5	0.6	1	1	0	0	[15]
49	E.R + SWCNT 3%	5.7	5.8	1.4	1.6	1	1	0	0	[15]
50	E.R + SWCNT 5%	7.5	7.8	2.4	2.8	1	1	0	0	[15]
51	E.R+ Graphite 1%	3.1	3.2	0.2	0.2	1	1	0	0	[15]
52	E.R + Graphite 3%	3.5	3.8	0.1	0.1	1	1	0	0	[15]
53	E.R + Graphite 5%	3.5	3.8	0.1	0.1	1	1	0	0	[15]
54	E.R + Fullerene 1%	3.2	3.4	0.2	0.3	1	1	0	0	[15]
55	E.R + Fullerene 3%	3.5	3.8	0.3	0.3	1	1	0	0	[15]
56	E.R + Fullerene 5%	4	4.1	0.1	0.2	1	1	0	0	[15]
57	E.R + CNF 1%	7.1	8	2.7	2.8	1	1	0	0	[15]
58	E.R + CNF 3%	12.8	15	6	6.2	1	1	0	0	[15]
59	E.R + CNF 5%	15	17	7	7.3	1	1	0	0	[15]
60	Fe ₃ O ₄	4.9	5.5	1.3	1.6	0.8	1.1	0.1	0.2	[16]
61	BaFe ₁₂ O ₁₉	1.42	1.50	0	0	1.04	1.14	0	0	[16]
62	SrFe ₁₂ O ₁₉	1.22	1.5	0	0	1.05	1.12	0	0	[16]
63	wax comp. (wax-30% Ni/MWCNT (δ=3))	6	8	1	4	0.96	1.07	-0.01	0.11	[17]
64	wax comp.(wax-30% Ni/MWCNT (δ=7.5))	7.4	12.4	1.25	4	0.94	1.12	-0.01	0.23	[17]
65	wax comp. (wax-30% Ni/MWCNT (δ=15))	18.5	36.25	11.25	62.5	0.85	1.42	0.01	0.36	[17]
66	BaFe ₁₂ O ₁₉ /a-Fe ₂ O ₃ (Fe/BaM 1:8)	4.25	5.9	0.1	1.1	0.92	1.15	0.06	0.15	[18]
67	BaFe ₁₂ O ₁₉ /a-Fe ₂ O ₃ (Fe/BaM 1:6)	4.9	6.4	0.55	1.75	1	1.2	0.06	0.20	[18]
68	BaFe ₁₂ O ₁₉ /a-Fe ₂ O ₃ (Fe/BaM 1:4)	4.6	6.15	0.35	1.2	0.97	1.2	0.08	0.185	[18]
69	BaFe ₁₂ O ₁₉ /a-Fe ₂ O ₃ (Fe/BaM 1:2)	3.9	4.55	0	0.35	0.8	1.4	0.02	0.325	[18]
70	Activated Carbon	3	3	0	0	0.3	0.98	-0.24	0	[10]
71	PGCFs (700 °C)	10	40	8	44	0.92	0.98	-0.07	-0.04	[10]
72	PGCFs (800 °C)	19	90	22	76	0.89	1.06	0	0.15	[10]
73	PGCFs (900 °C)	19	119	59	135	0.52	0.76	0.02	0.25	[10]
74	Cu-NZF	3.73	3.85	0.063	0.16	0.93	1.11	0.025	0.19	[19]
75	Cu-NZF/PZT (3 : 1)	3.89	3.95	0.2	0.25	0.97	1.15	0.015	0.17	[19]
76	Cu-NZF/PZT (1 : 1)	4.02	4.1	0.23	0.26	1	1.15	0.01	0.06	[19]
77	Cu-NZF/PZT (1 : 3)	4.15	4.2	0.16	0.21	1.02	1.16	0.01	0.075	[19]
78	PZT	4.4	4.53	0.14	0.17	1	1	0	0	[19]
79	BaTiO ₃ / polyaniline (PANI %0)	20	30	15	30	0.75	1.75	0.1	1.25	[20]
80	BaTiO ₃ / polyaniline (PANI %0.5)	8	48	10	19	0.9	1.5	0	0.6	[20]
81	BaTiO ₃ / polyaniline(PANI %2)	10	28	5	20	0.75	1.6	0	0.75	[20]
82	BaTiO ₃ / polyaniline (PANI %4)	5	183	0	158	0.6	2.4	0	2.2	[20]
83	BaTiO ₃ / polyaniline (PANI %6)	20	50	5	50	1	2.5	0	1.8	[20]
84	BaTiO ₃ / polyaniline (PANI %8)	10	38	1	12	0	6	0	2.2	[20]
85	CIP/GRP composites	6.2	11.2	0	3.9	1.7	3.1	0.55	1.25	[21]
86	TiO ₂ powder (M40)	13	13.75	1	1.25	1	1.05	0	0.03	[22]
87	M41	32	34	2.6	5	1	1	-0.01	0.01	[22]
88	M42	16.25	17.5	1.25	3.75	1	1	-0.01	0.02	[22]
89	Carbonyl-iron/Fe ₉₁ Si ₉ composites (9:1)	27.5	35	6	13.5	1.4	2.5	0.6	0.81	[23]
90	Carbonyl-iron/Fe ₉₁ Si ₉ composites (2.3:1)	22	24.5	2.4	4.8	1.35	2.25	0.54	0.72	[23]
91	Carbonyl-iron/Fe ₉₁ Si ₉ composites (1:1)	14.5	15	1.25	2	1.3	2.2	0.42	0.6	[23]
92	carbonyl-iron powders (CIP)	29.5	44.5	10	24.5	1.6	2.85	0.64	1.01	[23]
93	Fe ₉₁ Si ₉ powders (FSP)	10	10	0	0	0.9	1.65	0.24	0.32	[23]
94	M	5.1	5.3	0.1	0.2	1.035	1.056	0.027	0.06	[24]
95	MC	7.65	8.5	1.45	1.8	1.041	1.071	0.015	0.042	[24]
96	MWCNT (30%) + TPU	14.9	15.9	2.75	3.5	1	1	0	0	[25]
97	TiO ₂ (30%) + TPU	3.5	4	-0.25	0	1	1	0	0	[25]
98	TiO ₂ coated MWCNT (30%)+ TPU	5	5	0.8	1.1	1	1	0	0	[25]
99	TiO ₂ coated MWCNT (15%) + Fe ₃ O ₄ (15%)	6.5	7	1.25	1.5	1	1.2	-0.05	0.07	[25]
100	RAM	2.5	3.8	-0.1	-0.1	1	1.2	0	0	[26]
101	RAM+ 20% carbonyl iron	3	7.5	0.3	0.3	1	2	0.4	0.55	[26]
102	RAM+ 30% carbonyl-iron	3.8	9	0.4	0.5	1	2.4	0.6	0.8	[26]
103	RAM+ 40% carbonyl-iron	4	12	1	1.08	1	3.2	0.9	1.35	[26]
104	RAM+ 45% carbonyl-iron	5.7	14	1.35	1.45	1	3.5	1	1.7	[26]
105	Graphene	18	20	7.5	9.5	0.88	1.1	-0.45	0.082	[27]
106	MWCNT	14.9	15.9	2.8	4	0.89	1.1	-0.05	0.025	[27]
107	Ba _(1-x) La _x Fe ₁₂ O ₁₉ (x=0)	3.5	3.66	0.01	0.16	1	1.1	0.01	0.05	[28]
108	Ba _(1-x) La _x Fe ₁₂ O ₁₉ (x=0.05)	3.74	4.2	0.28	0.28	1.25	3.9	0.36	0.42	[28]
109	Ba _(1-x) La _x Fe ₁₂ O ₁₉ (x=0.1)	3.65	3.8	0.01	0.12	0.8	1.1	0.01	0.08	[28]