

طراحی و شبیه‌سازی ساختار پوشش جاذب مایکروویو به منظور کاهش RCS با استفاده از روش PSO

منصور نجاتی جهرمی^{۱*}، اسماعیل زارعزاده^۲، امیرمهدی سازدار^۳

۱- استادیار، ۲ و ۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت: ۹۷/۱۱/۲۴، پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۸)

چکیده

جاذب‌ها برای جلوگیری از انعکاس موج و عدم تداخل با موج مورد آزمایش، در کاهش RCS استفاده می‌شوند. بدین ترتیب که با ایجاد تضعیف در موج با استفاده از مواد به‌کاررفته در جاذب، میزان انعکاس را پائین می‌آورند. مواردی که در ارتباط با این انعکاس‌ها باید در نظر گرفته شود، اثر این امواج است که به‌عنوان «انعکاس‌های خالص محیط» نامیده می‌شوند. خطای به‌وجود آمده ناشی از در نظر نگرفتن انعکاس‌های خالص محیط و دیگر مشکلات ایجادشده به هنگام ضعیف بودن موج اصلی، از نکات قابل توجه است. در این مقاله سعی شده است ضخامت بهینه ماده جاذب با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO باهدف حداقل میزان بازتاب موج الکترومغناطیس تعیین شود. از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم مقادیر مقاومت صفحه‌ای و همچنین از الگوریتم PSO برای تعیین ضخامت بهینه صفحه استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تعیین پارامترهای پوشش جاذب مایکروویوی تأثیر به‌سزایی در میزان جذب امواج دارد. روش به‌کار گرفته‌شده شرایط رسیدن به پوشش مطلوب را فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: رادار، مایکروویو، مواد جاذب، الگوریتم PSO، الگوریتم ژنتیک

Design and Simulation a Microwave Absorbntion Coating Structure to Reduce RCS Using the PSO Method

M. Nejadi Jahromi^{*}, E. Zarezadeh, A. M. Sazdar

Shahid Sattary Aeronautical University of Science and Technology

(Received: 13/02/2019; Accepted: 29/12/2019)

Abstract

Absorbents are used in RCS reduction to prevent reflection of the wave and not interfere with the test wave. By reducing the amount of reflection in a wave using materials used in adsorbents, they reduce the reflection. The things that are to be considered in relation to these reflections are the effects of these waves, which are termed "pure environmental reflections", the error caused by not considering the pure reflections of the environment and other problems caused by weaknesses. The main wave of the note is noteworthy. In this research, the optimum thickness of adsorbent material has been determined using genetic and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms with the aim of determining the minimum amount of electromagnetic wave reflection. The genetic algorithm is used to adjust the plate resistance values as well as the PSO algorithm to determine the optimal screen thickness. The results show that determination of microwave absorption coating parameters has a significant effect on the absorption rate of the wave. The applied method provides the conditions for achieving optimal coverage.

Keywords: Radar, Microwave, Absorbing Materials, PSO Algorithms, Genetic Algorithm

*Corresponding Author E-mail: nejati@aut.ac.ir

۱. مقدمه

داشته باشد و از طرفی میزان پوشش‌دهی در نقطه بهینه از نظر قطر و وزن ماده پوششی فراهم شود.

یکی از روش‌های پیاده‌سازی پوشش RAM^2 استفاده از صفحه سالیسبوری^۳ است [۳]. این ساختار متشکل از یک صفحه مقاومتی تلفاتی است که در فاصله $\lambda/4$ از یک هادی کامل الکتریکی (PEC^4) قرار گرفته است. مشکل اساسی که صفحه سالیسبوری دارد ضخامت زیاد و وابستگی فرکانسی آن است. نشان داده شده است که این ضخامت می‌تواند با قرار دادن صفحه تلفاتی بر روی یک سطح مغناطیسی کاهش یابد [۴]. در واقع در این حالت دیگر به فاصله نیاز نخواهد بود. پیاده‌سازی سطوح مغناطیسی نیز توسط پژوهشگران ارائه شده است [۵].

استفاده از سطوح هادی مغناطیسی مصنوعی (AMC^5) می‌تواند به‌طور قابل توجهی ضخامت صفحه سالیسبوری را کاهش دهد. در مقایسه با یک صفحه فلزی معمولی که به‌صورت یک سطح امپدانس پایین عمل نموده و دارای ضریب انعکاس ۱- است، سطوح AMC دارای امپدانس بسیار بالا و ضریب انعکاس ۱+ هستند که این بدین معنی است که می‌توانند مانند یک هادی مغناطیسی عمل نمایند. علاوه بر این سطوح AMC می‌تواند برای کنترل و هدایت امواج الکترومغناطیسی پراکنده شده از جسم همچون روش شکل‌دهی مورد استفاده قرار بگیرد [۶].

در این حالت امواج الکترومغناطیسی بازگشتی در راستایی غیر از راستای موج تابشی هدایت می‌شود تا توسط آنتن فرستنده قابل‌ردیابی نباشد. بدین منظور سطوح ترکیبی PEC و AMC که در یک ساختار شطرنجی شکل قرار می‌گیرند، پیشنهاد شده است [۷]. در کارهای انجام‌شده به موضوع یافتن ضخامت بهینه پوشش برای کاهش RCS مورد توجه واقع نشده است. مفهوم ضخامت بهینه و بهترین شرایط عملکردی در کاهش RCS به‌طوری که از کمترین میزان مصرف پوشش‌دهی (کاهش وزن و کاهش هزینه) مسئله اصلی است. در این مقاله سعی شده است ضخامت بهینه ماده جاذب با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO باهدف حداقل میزان بازتاب موج الکترومغناطیس تعیین شود. از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم مقادیر مقاومت صفحه‌ای و از الگوریتم PSO برای تعیین ضخامت صفحه بهینه استفاده می‌شود تا شرایط هدف‌گذاری شده احراز گردد.

۲. روش تحقیق و معادلات حاکم

مواد جاذب مایکروویو با میزان بازتاب و جذب آن‌ها دسته‌بندی می‌گردند. جاذب‌های تطبیق امپدانس نسبت به موج تابشی، یک محیط درجه‌بندی شده ارائه می‌دهند؛ درحالی‌که جاذب‌های

آنتن‌های گیرنده رادار پس از دریافت امواج و آنالیز زمان انتشار، پارامترهایی مثل جهت انتشار و سرعت انتشار موج و همچنین سایر پارامترهای دیگر را تشخیص داده و نوع، میزان بزرگی و سرعت هدف را مشخص می‌کنند. استتار در حقیقت به معنای از بین بردن اختلاف‌های فیزیکی یک جسم با محیط اطراف آن است. این اختلاف‌ها می‌تواند در طیف‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک، حرارتی و راداری باشد. برای جلوگیری از تشخیص ادوات موردنظر از دید رادار مبحث کاهش سطح مقطع راداری^۱ یا کاهش RCS مطرح است که امواج برگشتی را کمینه می‌کند. کاهش RCS شامل دو روش اصلی است:

الف- طراحی بدنه شیء موردنظر به‌طوری که امواج تابیده را در جهت‌های مختلف پراکنده سازد.

ب- استفاده از پوشش جاذب مایکروویو.

در روش پوشش جاذب مایکروویو، بدنه شیء موردنظر را با ماده جاذب امواج پوشش می‌دهند به‌طوری که قابلیت جذب امواج برخوردی را در باند فرکانس بخصوصی داشته باشد. هرچقدر امواج بیشتری جذب ماده شود، امواج برگشتی به رادار کمتر خواهد شد [۸].

از روش انحراف موج بازتابش برای جلوگیری از ره‌گیری هواپیماها نیز استفاده می‌شود. همان‌طور که در بحث اپتیک زاویه تابش و انعکاس نور به یک سطح صاف همواره برابر و در عوض زاویه تابش و انعکاس یک دسته پرتو موازی به یک سطح ناصاف و خمیده همواره متفاوت است، این اصل در فناوری کاهش RCS برقرار است و اغلب در صنایع هوایی و هواپیماها مطرح می‌شود. در هواپیماهای جنگنده قدیمی به‌دلیل بالا بودن تعداد مکان‌های خمیده و سطوح ناصاف ناشی از محل استقرار بمب‌ها و موشک‌ها و نیز خمیدگی‌ها و شکل آن‌ها، سطح‌های مختلف پرنده امواجی را که از طریق رادار در فضا منعکس می‌شد پس از برخورد با پرنده در جهات گوناگون منعکس می‌کرد که قسمتی از آن توسط ایستگاه‌های کنترل زمینی دریافت و موقعیت پرنده شناسایی می‌شد که با منحرف کردن تمامی موج انتشاریافته در یک مسیر، شناس دریافت امواج را در زمین برای آنتن‌های زمینی بسیار کاهش داده می‌شود لذا در جنگنده‌های نسل جدید تا حد ممکن سعی شده است تا سطح مقطع زیرین آن‌ها یا به‌صورت صاف یا طوری زاویه‌دار شکل‌دهی شود که موج تابیده شده را فقط در یک جهت منحرف کند [۹].

در این مقاله کاهش RCS با پوشش‌دهی سطوح جاذب مایکروویو موردنظر است به‌طوری که ضخامت بهینه مواد جاذب راداری در فرکانس‌های مختلف از نظر جذب بهترین عملکرد را

² Radar Absorbing Material (RAM)

³ Salisbury Screen

⁴ Perfect Electric Conductor (PEC)

⁵ Artificial Magnetic Conductor (AMC)

¹ Radar Cross Section (RCS)

این پارامترها از مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال و بازتاب ماده محاسبه می‌گردد [۱۲]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

$$\mu_r = \mu' + i\mu'' \quad (2)$$

که به ترتیب، ε' و μ' بخش حقیقی و ε'' و μ'' بخش موهومی ε_r و μ_r را بیان می‌کنند. وقتی ماده تلف‌دار است، ضریب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی مختلط هستند و مقداری از انرژی الکترومغناطیسی تابشی از بین می‌رود [۱۳].

شکل (۱) یک ساختار یک ماده جاذب امواج رادار یا RAM تک لایه را نشان می‌دهد که لایه‌ای از ماده جاذب تلف‌دار با ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ و ε) و ضخامت d در تماس با صفحه فلزی قرار داده شده است [۱۴].

در حالت مواد جاذب راداری تک لایه، لایه‌ای از ماده جاذب در تماس با یک صفحه فلزی (شکل ۱) قرار داده می‌شود.

مشخصه‌های جذب مواد جاذب راداری با تغییر ضخامت مواد جاذب و ویژگی‌های الکترومغناطیسی (ضریب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی) آن‌ها تغییر می‌کند. بازگشت انرژی الکترومغناطیسی یک ماده جاذب راداری تک لایه به‌عنوان تابعی از فرکانس با (۳) و (۴) توصیف می‌شود [۱۵].

$$R(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{i \operatorname{Arctan}(kd) - 1}{i \operatorname{Arctan}(kd) + 1} \right) \quad (3)$$

که

$$k = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu\varepsilon}, \quad i = \sqrt{-1} \quad (4)$$



شکل ۱. RAM تک لایه

در (۳) و (۴)، μ و ε به ترتیب مقادیر مختلط ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی ماده جاذب، k عدد موج، f فرکانس موج الکترومغناطیسی تابشی، c سرعت نور در خلأ و d ضخامت لایه جاذب هستند. هر دو ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی با فرکانس تغییر می‌کنند. مواد جاذب با تعداد لایه‌های دو یا بیشتر می‌توانند انباشته شود (شکل ۲) تا اینکه عملکرد کلی ماده جاذب راداری بهبود یابد.

شکل (۲) یک RAM دولایه که مواد جاذب با ویژگی‌های الکترومغناطیسی متفاوت با یکدیگر انباشته شده‌اند و در تماس با یک صفحه فلزی قرار دارند را نشان می‌دهد [۱۴].

رزونانسی از تداخل مخرب امواج بازتابی لایه‌های مختلف در جاذب استفاده می‌نمایند تا بازتاب کاهش یابد. جاذب‌های رزونانسی برای کاربردهای نظامی به‌دلیل ضخامت و دقت جاذب‌های هرمی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. جاذب‌های رزونانسی به دودسته لایه‌های جومن، سالیسبوری و دالنباخ دسته‌بندی می‌شوند [۸]. جاذب‌های جومن از صفحات مقاومتی جدا از هم با جداکننده‌های کم تراکم انباشته می‌شوند، اما در سالیسبوری جاذب در فاصله $\lambda/4$ از یک هادی کامل الکتریکی به‌منظور ایجاد افت در موج تابشی قرار داده می‌شود درحالی‌که لایه‌های دالنباخ مانند حالت‌های قبلی است فقط از صفحه‌های مقاومتی استفاده نمی‌شود. در هر دو حالت جومن و دالنباخ، طراحی نیازمند به بهینه‌سازی یک معادله غیرخطی به‌عنوان بازتاب است که به‌صورت تحلیلی برای چندین لایه نمی‌توان حل نمود [۹] و می‌توان با روش‌های ترکیبی و فراابتکاری^۱ مسئله را حل کرد.

عملکرد جاذب به تعداد لایه‌ها در جاذب، ویژگی‌های لایه و ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها وابسته است. طراحی جاذب‌ها با هدف‌گذاری که قبلاً اشاره شد، یک پروفایل امپدانسی درجه‌بندی شده را برای موج تابشی در بهترین عملکرد ارائه می‌نماید. همچنین می‌تواند طراحی جاذب‌ها به‌عنوان تابعی از زاویه تابشی بهینه را ارائه دهد.

برای توصیف فعل‌وانفعال یک موج الکترومغناطیسی با مواد جاذب مایکروویو^۲، فرایند تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به انرژی گرمایی به‌عنوان یک پدیده توصیف می‌گردد [۹]. بر مبنای اصل ذخیره انرژی، موج الکترومغناطیسی تابشی روی یک ماده، بازتاب و تضعیف می‌شود یا از میان آن عبور می‌کند. پاسخ ماده به موج بستگی به مشخصه‌های ذاتی آن دارد [۱۰].

جذب انرژی توسط ماده لزوماً به این معنی نیست که ماده گرم می‌شود، بلکه بعضی اوقات عکس آن رخ می‌دهد یعنی ماده خنک می‌شود. رفتار پلیمرهای هادی به‌وسیله تشعشع الکترومغناطیسی در باند X (۸-۱۲ GHz) نمایش این حالت را نشان می‌دهد. نتایج چگونگی هدایت این پلیمرها و تأثیر آن‌ها بر روی جذب انرژی الکترومغناطیسی و چگونگی استفاده این مواد در تولید مواد جاذب راداری و کاربرد آن در [۱۱] نشان داده شده است.

ضریب گذردهی الکتریکی (ε) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) پارامترهای مربوط به ویژگی‌های دی‌الکتریکی و مغناطیسی یک ماده است و مستقیماً وابسته به مشخصه‌های جذب آن‌ها هستند [۹]. ضریب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی به ترتیب با (۱) و (۲) ارائه می‌شوند. مقادیر

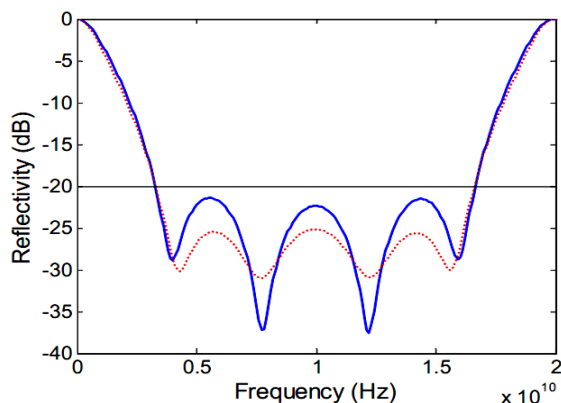
^۱Meta Heuristic

^۲Microwave Absorbing Materials

ب) روش با پیچیدگی^۴ کم، اغلب منجر به یک ساختار قابل پیاده‌سازی و ساخت می‌شود.

۳. بهینه‌سازی جاذب برای یک زاویه تابش

امواج الکترومغناطیس، پروفایل‌های بازتاب وابسته به پلاریزاسیون دارند. اثر پلاریزاسیون در شکل (۴) نشان می‌دهد که پلاریزاسیون‌های TE^۵ (خط نقطه‌چین) و TM^۶ (خط پیوسته) منجر به بازتاب‌های مختلف می‌شوند. تابع هدف پهنای باند استفاده‌شده برای بهینه‌سازی این طراحی، آن طراحی‌ها را که پهنای باندهای مشابه در بازتاب هدف دارند (در اینجا -۲۰ dB) ارائه می‌دهند [۱۷]. بهینه‌سازی جاذب در تک زاویه موج تابشی از طریق تنظیم مقادیر مقاومت صفحه‌ای برای هر لایه به دست می‌آید. زاویه تابشی، ضخامت لایه، ضخامت جداکننده و ضریب گذردهی الکتریکی جداکننده همگی ثابت می‌مانند. جاذب بهینه‌شده شامل پروفایل‌های مقاومتی صفحه‌ای از صفحات کم مقاومت سطح فلزی به صفحات مقاومت بالا در محیط هوا/جاذب طراحی می‌گردد.



شکل ۴. پروفایل‌های بازتاب بهینه‌شده برای موج تابشی میکروویو پلاریزه‌شده TM (خط پیوسته) و TE (خط نقطه‌چین) در ۳۰ درجه روی یک جاذب تک لایه [۱۷]

در شکل (۵) مقاومت‌های صفحه‌ای بهینه‌شده متوسط به‌عنوان تابعی از زاویه تابشی برای جاذب جومن چهار لایه‌ای بهینه‌شده برای بیشینه پهنای باند زیر ۲۰ dB آورده شده است. مقاومت کم نزدیک‌ترین صفحه به PEC و بیش‌ترین مقاومت نزدیک‌ترین صفحه به محیط هوا است. خطوط عدم قطعیت گسترده‌های مقاومتی را نشان می‌دهند که پهنای باند یکسان تولید کرده‌اند. ضریب گذردهی الکتریکی جداکننده، ۱/۱ است [۱۷].



شکل ۲. RAM دولایه

بازگشت انرژی الکترومغناطیسی با یک ماده جاذب راداری دولایه با (۵) محاسبه می‌شود [۱۵]:

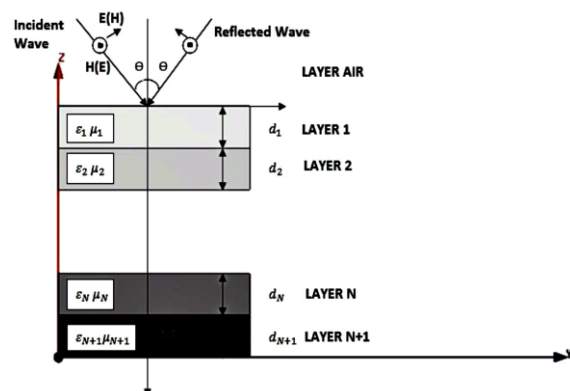
$$R(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left| \frac{B-1}{B+1} \right| \quad (5)$$

در (۵) مقادیر B و γ به صورت (۶) و (۷) است.

$$B = \frac{\left(\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \tanh(\gamma_2 d_2) \right)}{\left(\sqrt{\frac{\mu_1 \epsilon_2}{\mu_2 \epsilon_1}} \tanh(\gamma_1 d_1) \tanh(\gamma_2 d_2) \right)} \quad (6)$$

$$\gamma = i(2\pi f / c) d \sqrt{\mu \epsilon} \quad (7)$$

صفحات مقاومتی، جاذب‌های میکروویو پهن باند تولید می‌کنند. پهنای باند جاذب با تعداد صفحات مقاومتی افزایش می‌یابد و پروفایل مقاومتی از طریق عملکرد جاذب مشخص می‌شود که برای طراحی بهینه این جاذب با الگوریتم ژنتیک^۱ حالت بهینه در شرایطی است که زوایای تابشی مایل باشد. در [۱۶] و شکل (۳) پژوهش در مورد تأثیر زاویه تابش روی پهنای باند جاذب برای ۱ تا N لایه با جداکننده‌هایی با ضریب گذردهی الکتریکی بالا و لایه‌های محافظ، نشان می‌دهد که پهنای باند در تابش عمود نسبت به زاویه حدود ۳۰ درجه نسبتاً ثابت می‌ماند و روش بهینه‌سازی ترکیبی بر پایه الگوریتم ژنتیک به‌طور مؤثر در رسیدن به اهداف بهینه‌سازی شرایط زیر را ارائه می‌دهد [۱۳]:



شکل ۳. چیدمان فیزیکی مواد برای طراحی جاذب میکروویو [۱۶]

الف) در طراحی جاذب‌های میکروویو پهن باند چندلایه‌ای سازگاری^۲ و هم‌گرایی^۳ لازم را دارد لذا برای این منظور مناسب است.

⁴ Complexity

⁵ Transver electric (TE) mode

⁶ Transver magntec (TM) mode

¹ Genetic algorithm

² Consistency

³ Convergency

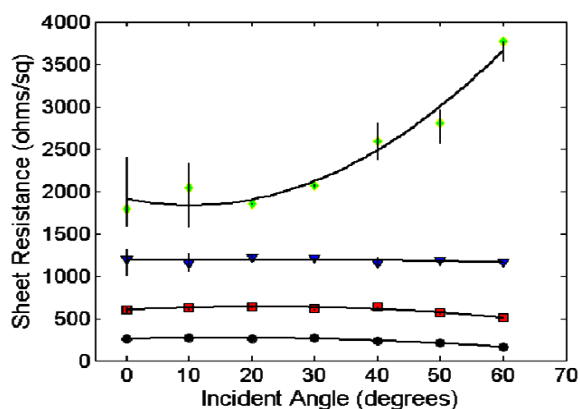
مایل بررسی شده‌اند که نشان می‌دهند، تابش عمود به جاذب بهینه‌شده منجر به طراحی جاذب با بالاترین پهنای باند تا ۳۰ درجه می‌گردد. مزایای بهینه‌سازی یک طراحی جاذب در زاویه بالای تابش این است که جاذب با اندکی افزایش پهنای باند مانند تابش عمود عمل می‌نماید درحالی‌که در حالت عکس درست نیست: یک جاذب بهینه‌شده در تابش عمود در زوایای تابش بزرگ پهنای باند خیلی ضعیفی دارد [۱۸].

طراحی‌های بهینه یک جاذب در زوایای مختلف تابش، پروفایل مقاومتی نسبتاً ثابت صفحه را حفظ می‌نماید به‌جز برای لایه بیرونی که به‌منظور افزایش زاویه تابش شرایط بعد از حدود ۳۰ درجه احراز گردید و ضخامت این جاذب‌ها با زاویه تابشی افزایش می‌یابد. عملکرد پهنای باند با تعداد لایه‌ها در طراحی جاذب افزایش می‌یابد و با افزایش جداکننده ضریب گذردهی الکتریکی کاهش می‌یابد. یک لایه محافظ در محیط هوا/جاذب، پهنای باند جاذب را در زوایای پایین‌تر افزایش می‌دهد و آن‌ها در زوایای کمتر کاهش می‌دهد [۱۹].

۴. طراحی جاذب‌های مایکروویو

الگوریتم ژنتیک از جستجوی ابتکاری برخوردار است که تقلیدی از یک انتخاب طبیعی است. این روش به روال عادی برای تولید راه‌حل‌های مفید به‌منظور بهینه‌سازی به کار می‌رود. الگوریتم‌های ژنتیک به کلاس بالاتری از الگوریتم‌های تکاملی تعلق دارند که راه‌حل‌هایی برای مسائل بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های به‌کاررفته و الهام گرفته از تکامل طبیعی مانند ارت، تغییر و انتخاب و تقاطع را تولید می‌نمایند [۲۰] و از روش‌های آماری قوی و بهینه‌ساز برای حل مسائل ترکیبی پیچیده است. به‌خصوص در حوزه‌های پژوهشی چندبعدی و چندحالتی، مؤثر و کاربردی است و به‌طور هم‌زمان مجموعه‌ای از نقاط در فضای بهینه‌سازی را پردازش می‌کند و عملگرهای تصادفی را برای تبدیل نسلی از داده‌ها به نسل دیگر مورد استفاده قرار می‌دهد. در اینجا از این روش برای تنظیم مقادیر مقاومت صفحه‌ای استفاده شده است، همچنین PSO^۱ یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و بر اساس تکرار است که منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته‌جمعی پرندگان و ماهی‌هاست [۲۱] که در اینجا برای ضخامت بهینه صفحه استفاده گردیده است.

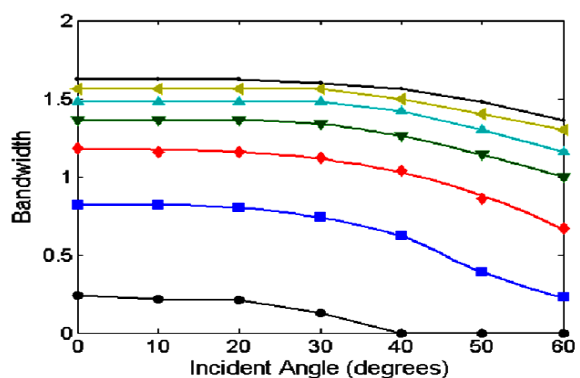
فلوچارت کلی به‌کارگیری روش PSO به‌صورت شکل (۷) است. در این فلوچارت الگوریتم با مقداردهی اولیه محل ذرات شروع شده و در هر مرحله با توجه به تابع هزینه/سود، ذرات به بهترین محل تغییر مکان می‌دهند. در صورت دستیابی به مقدار تابع هزینه/سود موردنظر، الگوریتم پایان می‌یابد. روند نمای



شکل ۵. عملکرد جاذب بهینه‌شده [۱۷]

زاویه تابشی برای داشتن اثر کم روی مقاومت‌های صفحه تا حدود ۳۰ درجه دیده می‌شود. در زوایای بالاتر تابش، افزایش زیادی در مقاومت لایه بیرونی و کاهش اندکی در مقاومت‌های لایه‌های درونی وجود دارد. یک روند مشابه برای سایر جاذب‌ها با تعداد لایه‌های متفاوت وجود دارد. خطوط خطا در شکل (۵)، گستره مقاومت‌های صفحه را بیان می‌کند که به طراحی‌های بهینه‌شده یکسان منجر می‌گردد.

عملکرد پهنای باند برای طراحی‌های جاذب با تعداد افزایشی صفحات مقاومتی و زوایای مختلف تابش در شکل (۶) نشان داده شده است. پهنای باند به‌منظور کاهش در زاویه تابشی حدود ۳۰ درجه برای تمام جاذب‌ها مشاهده می‌گردد.



شکل ۶. پهنای باندهای جاذب بهینه‌شده در تابش مایل برای جاذب‌های با لایه‌های ۱ (دوایر مشکی) تا ۷ (نقاط مشکی) [۱۷].

مدل تصحیحی استفاده شده برای محاسبه بازتاب از یک جاذب چندلایه سازگار با مدل خط انتقال استفاده می‌گردد. داشتن یک ضخامت محدود برای صفحات مقاومتی منجر به جابجایی فرکانس مرکزی باند جذب به فرکانس پایین‌تر می‌شود. پهنای باند یک جاذب به زاویه تابش ۳۰ درجه نسبت به عمود بسیار وابسته است. در زوایای تابشی بالاتر پهنای باند کاهش می‌یابد.

چندین راه‌کار برای بهینه‌سازی جاذب‌ها در زوایای تابش

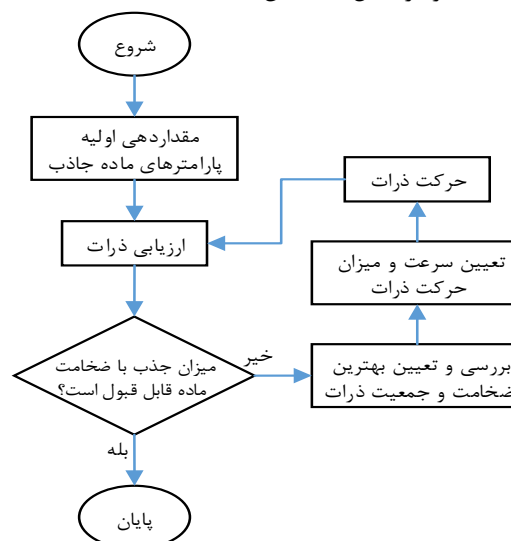
^۱ Particle Swarm Optimization (PSO)

در شکل های (۹) و (۱۱) محور عمودی بیانگر میزان موج برگشتی است. برای بررسی و دقت بیشتر بر رفتار ماده جاذب، میزان انعکاس از سطح دو ماده با اندیس ۱ و ۳۳، در شکل (۱۳) به صورت ارقام لگاریتمی نشان داده شده است. در این شکل محور افقی ضخامت های دلخواه از ۰/۱ mm تا ۸mm می باشند و میزان انعکاس هر ماده تحت تابش پنج فرکانس مختلف ارزیابی، محاسبه شده است. به صورت بصری، در صورتی که میزان بازتاب 10^{-5} قابل قبول فرض شود، در مورد ماده مورد بررسی و به ازای فرکانس های مختلف می توان ضخامت ماده جاذب مورد نیاز را انتخاب کرد. نکته قابل استنباط از این شکل این است که با افزایش فرکانس، به ازای میزان بازگشت ثابت، ضخامت لایه جاذب مورد نیاز کمتر می شود. به طور خلاصه می توان گفت ضخامت لایه جاذب تابعی از فرکانس و مشخصات جاذب است.

جدول ۱. مشخصات فرضی ۳۳ مورد جاذب مورد تحلیل

ردیف	μ'	μ''	ϵ'	ϵ''
۱	۲/۴۰	۱/۲۰	۳۸/۰۰	۱۸/۵۰
۲	۲/۲۰	۱/۱۵	۳۷/۰۰	۱۷/۰۰
۳	۲/۰۰	۱/۱۰	۳۶/۰۰	۱۶/۰۰
۴	۱/۹۰	۱/۰۵	۳۵/۰۰	۱۵/۰۰
۵	۱/۸۰	۱/۰۲	۳۴/۰۰	۱۴/۰۰
۶	۱/۷۰	۱/۰۰	۳۳/۰۰	۱۳/۰۰
۷	۱/۶۰	۱/۰۰	۳۲/۰۰	۱۲/۵۰
۸	۱/۵۵	۰/۹۹	۳۱/۵۰	۱۲/۰۰
۹	۱/۵۴	۰/۹۷	۳۰/۵۰	۱۲/۰۰
۱۰	۱/۵۳	۰/۹۵	۳۰/۲۵	۱۱/۸۰
۱۱	۱/۵۲	۰/۹۳	۳۰/۰۰	۱۱/۵۵
۱۲	۱/۵۱	۰/۹۱	۲۹/۵۰	۱۱/۳۵
۱۳	۱/۵۰	۰/۸۹	۲۹/۲۵	۱۱/۱۵
۱۴	۱/۵۰	۰/۸۷	۲۸/۵۰	۱۱/۰۰
۱۵	۱/۵۰	۰/۹۵	۲۸/۰۰	۱۰/۸۰
۱۶	۱/۵۰	۰/۸۳	۲۸/۰۰	۱۰/۵۵
۱۷	۱/۵۰	۰/۸۱	۲۸/۰۰	۱۰/۳۵
۱۸	۱/۴۵	۰/۷۹	۲۸/۰۰	۱۰/۱۵
۱۹	۱/۴۰	۰/۷۷	۲۸/۰۰	۱۰/۰۰
۲۰	۱/۳۵	۰/۷۵	۲۸/۰۰	۹/۸۰
۲۱	۱/۳۰	۰/۷۳	۲۸/۰۰	۹/۲۰
۲۲	۱/۲۵	۰/۷۱	۲۸/۰۰	۹/۰۰
۲۳	۱/۲۳	۰/۷۰	۲۸/۰۰	۹/۲۰
۲۴	۱/۲۱	۰/۶۹	۲۸/۰۰	۹/۸۰
۲۵	۱/۱۹	۰/۶۸	۲۷/۵۰	۱۰/۰۰
۲۶	۱/۱۷	۰/۶۵	۲۷/۰۰	۱۰/۰۰
۲۷	۱/۱۵	۰/۶۳	۲۶/۵۰	۱۰/۰۰
۲۸	۱/۱۳	۰/۶۰	۲۶/۳۰	۱۰/۰۰
۲۹	۱/۱۰	۰/۶۰	۲۶/۲۵	۱۰/۰۰
۳۰	۱/۰۵	۰/۶۰	۲۶/۲۰	۱۰/۰۰
۳۱	۱/۰۰	۰/۶۰	۲۶/۱۵	۱۰/۰۰
۳۲	۱/۰۰	۰/۶۰	۲۶/۱۰	۱۰/۰۰
۳۳	۱/۰۰	۰/۶۰	۲۶/۰۵	۱۰/۰۰

طراحی جاذب های میکروویو چندلایه با استفاده از روش PSO با جزئیات بیشتر در شکل (۸) نشان داده شده است.

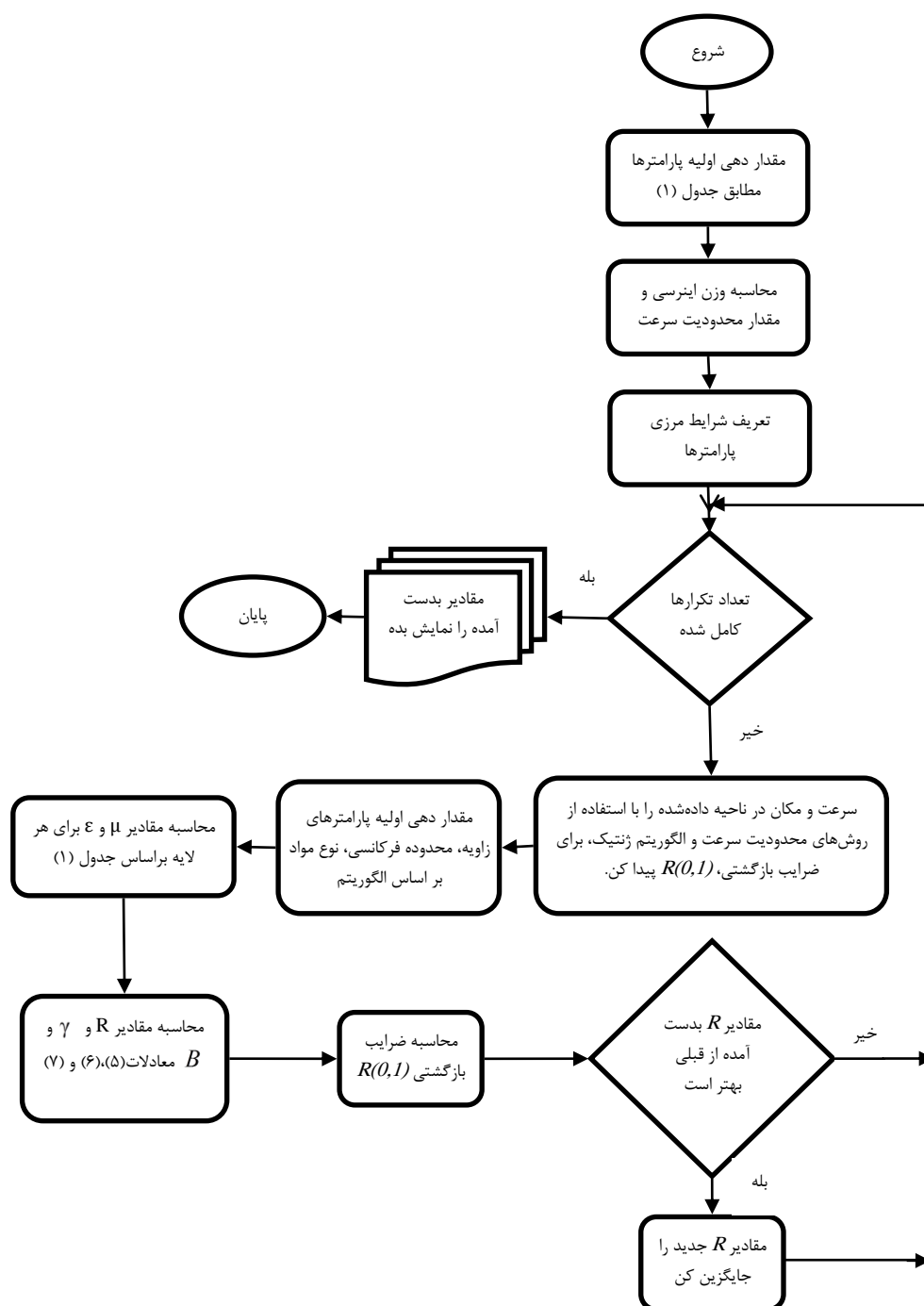


شکل ۷. بلوک دیاگرام کلی طراحی جاذب ها با PSO

۵. شبیه سازی، نتایج و ارزیابی

ضخامت لایه جاذب نقش غیر قابل انکاری در بازتاب و جذب امواج الکترومغناطیس دارد. در این بخش با استفاده از الگوریتم PSO برای ۳۳ ماده با مشخصات مندرج در جدول (۱)، از نظر ضریب جذب و بازتاب، ضخامت های بهینه محاسبه شده است، به طوری که کمترین بازتاب از سطح جاذب اتفاق بیافتد. در باند $18-2 \text{ GHz}$ ، محور عمودی نشانگر ضخامت جاذب است. از آنجایی که شدت موج بازگشتی از سطح یک ماده مورد نظر وابسته به فرکانس است، بهترین راه کار برای محاسبه ضخامت بهینه میانگین گیری است [۲۴].

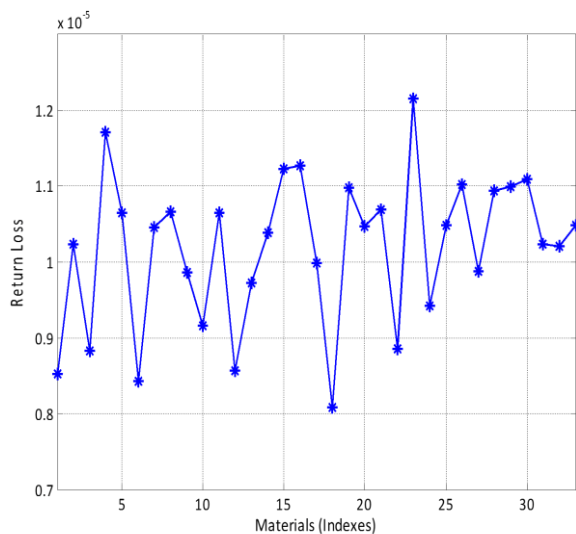
در این مقاله در مورد یک ماده با مشخصات فرض شده، به ازای فرکانس های مختلف در هر چهار باند k, C, X و Ku ، به طور مجزا ضخامت بهینه محاسبه شده و در نهایت برای به دست آوردن یک ضخامت بهینه در باند مورد نظر میانگین گیری صورت گرفته است. میانگین ضخامت های بهینه برای ۳۳ ماده جاذب مختلف با مشخصات فرضی جدول (۱)، در باندهای فرکانسی k, C, X و Ku ، در شکل (۹) نشان داده شده که در آن محور عمودی نشانگر ضخامت جاذب بر حسب میلی متر است. هر چه باند فرکانسی بالاتر رود، به خاطر عمق نفوذ کمتر ضخامت لایه جاذب مورد نیاز به صورت بهینه مقدار کمتری خواهد بود. شکل (۱۰) میانگین ضخامت بهینه را در کل باند $18-2 \text{ GHz}$ به ازای مواد مختلف نشان می دهد. در شکل (۱۱) با در نظر گرفتن ضخامت لایه جاذب میانگین بهینه، میزان موج بازگشتی از سطح هر کدام از مواد اشاره شده برای هر چهار باند فرکانسی محاسبه و ترسیم شده است.



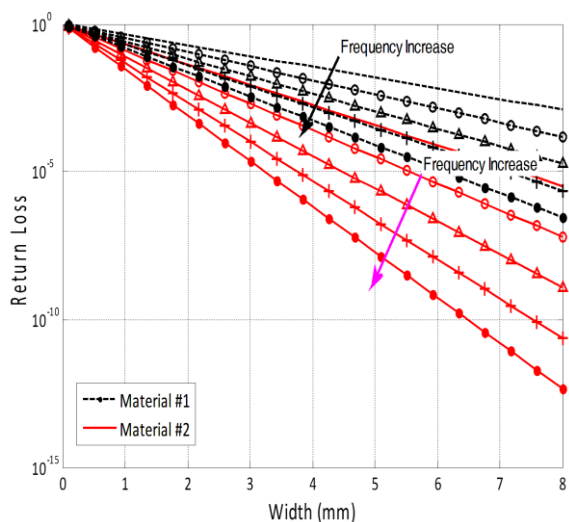
شکل ۸. روند نمای طراحی جاذب‌های مایکروویو چندلایه با استفاده از روش PSO

مایکروویوی نسبت به سایر روش‌های متداول، سرعت و دقت کسب نتیجه بهتر است و به‌تبع آن‌ها هزینه کمتر خواهد بود. این در حالی است که اگر بجای این روش از روش‌های عددی استفاده شود، با توجه به سازگاری، همگرایی و پایداری در این روش‌ها، گام‌های روش عددی انتخابی به‌عنوان متغیر اساسی یک مسئله مهم است به‌طوری‌که تحت شرایطی، ممکن است در یک کمینه

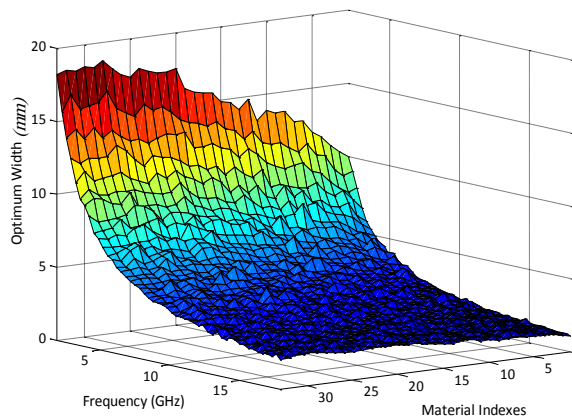
در این راستا برای داشتن دید کلی‌تر، نمودار سه‌بعدی ضخامت بهینه ماده جاذب بر اساس دو پارامتر فرکانس و نوع ماده استخراج‌شده و در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. میانگین بهینه به‌دست‌آمده نیز با استفاده از الگوریتم PSO برای کل باند ۲-۱۸ GHz، در شکل (۱۲) آمده است. در به‌کارگیری و استفاده از روش PSO جهت محاسبه ضخامت بهینه لایه جاذب



شکل ۱۲. نتایج بازتاب به ازای ضخامت بهینه میانگین برای سطوح مختلف در باند فرکانسی ۱۸ - ۲ GHz

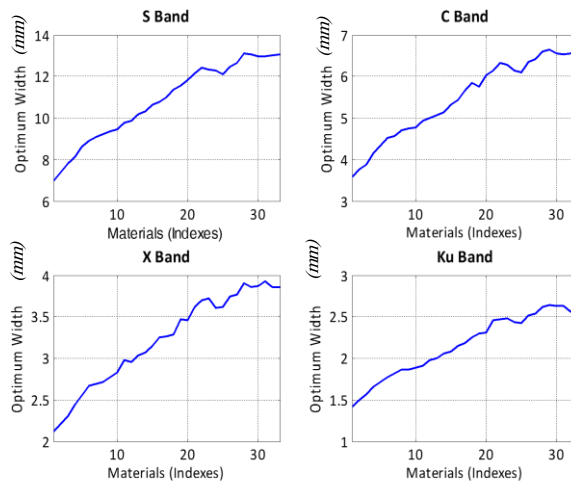


شکل ۱۳. نتایج بازتاب دو ماده به ازای ضخامت‌های مختلف و پنج فرکانس متفاوت.

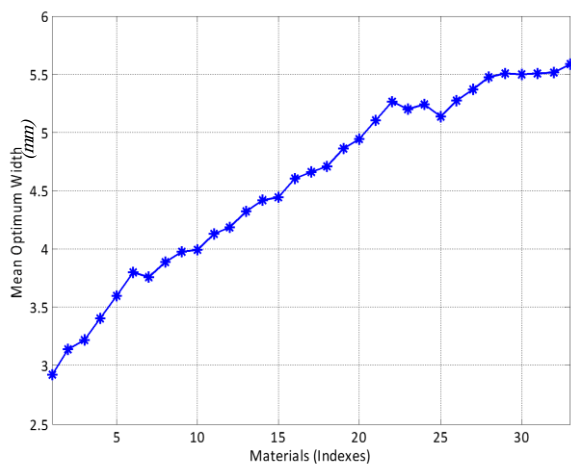


شکل ۱۴. نمودار سه‌بعدی ضخامت بهینه ماده برحسب میلی‌متر جاذب بر اساس فرکانس تابش و نوع ماده جاذب.

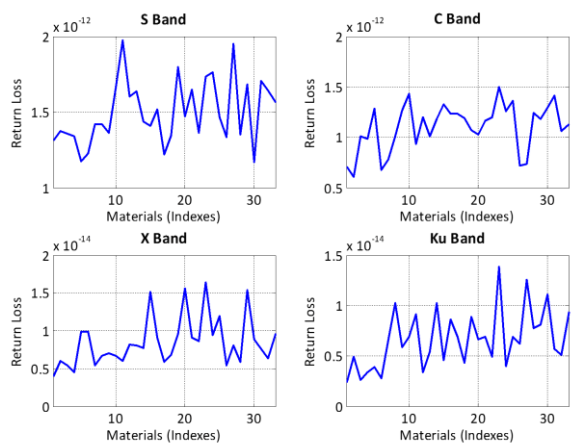
یا بیشینه محلی به تله افتاده و یا زمان بسیار طولانی برای محاسبه صرف شود. از این رو استفاده از روش PSO بسیار مطلوب و کارآمد است.



شکل ۹. میانگین ضخامت‌های بهینه برحسب میلی‌متر برای ۳۳ ماده مختلف در باندهای فرکانسی e, C, X و Ku



شکل ۱۰. میانگین ضخامت‌های بهینه برحسب میلی‌متر برای ۳۳ ماده مختلف



شکل ۱۱. نتایج بازتاب به ازای ضخامت بهینه میانگین برای سطوح مختلف در باندهای فرکانسی S, C, X و Ku.

- [6] Azarbar, A.; Mashhadi, M. "RCS Reduction Using Artificial Magnetic Conductor"; Iran. Electron. Ind. Mag. 2016, 7, 3.
- [7] Paquay, M.; Iriarte, J.C.; Ederra, I.; Gonzalo, R.; de Maagt, P. "Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2007, 55, 3630-3638.
- [8] Luukkonen, O.; Costa, F.; Simovski, C. R.; Monorchio, A.; Tretyakov, V. "A Thin Electromagnetic Absorber for Wide Incidence Angles and Both Polarizations"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2009, 57, 3119-3125.
- [9] Michielssen, E.; Sajer, J. M.; Ranjithan, S.; Mittra, R. "Design of Lightweight, Broad-Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithms"; IEEE Trans. Microw. Theory 1993, 41, 1024-1031.
- [10] Weile, D. S.; Michielssen, E.; Goldberg, D. E. "Genetic Algorithm Design of Pareto Optimal Broadband Microwave Absorbers"; IEEE Trans. Electromagn. C. 1996, 38, 3, 518-525.
- [11] Lee, J.; Yoo, M.; Lim, S. "A Study of Ultra-Thin Single Layer Frequency Selective Surface Microwave Absorbers with Three Different Bandwidths Using Double Resonance"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2015, 63, 221-230.
- [12] Li, Z.; Li, X.; Zong, Y.; Tan, G.; Sun, Y.; Lan, Y.; Zheng, X. "Solvothetical Synthesis of Nitrogen-Doped Graphene Decorated by Superparamagnetic Fe₃O₄ Nanoparticles and Their Applications as Enhanced Synergistic Microwave Absorbers"; Carbon 2017, 115, 493-502.
- [13] Cui, S.; Weile, D. S.; Volakis, J. L. "Novel Planar Electromagnetic Absorber Designs Using Genetic Algorithms"; IEEE Trans. Antennas Propag. 2006, 54, 1811-1817.
- [14] Chamaani, S.; Mirtaheri, S. A.; Shoooreldeli, M. A. "Design of Very Thin Wide Band Absorbers Using Modified Local Best Particle Swarm Optimization"; AEU-Int. J. Electron C. 2008, 62, 549-556.
- [15] Kent, S.; Kartal, M. "Genetic Algorithm Approach on Pyramidal Dielectric Absorbers"; Int. J. Rf. Microw. C. E. 2008, 18, 286-294.
- [16] Goudos, S. K. "Design of Microwave Broadband Absorbers Using a Self- Adaptive Differential Evolution Algorithm"; Int. J. Rf Microw. C. E. 20019, 19, 364-372
- [17] Chew, W. C. "Waves and Fields in Inhomogeneous Media"; IEEE Press. 1995.
- [18] Dib, N.; Asi, M.; Sabbah, A. "Optimal Design Of Multilayer Microwave Absorbers"; Prog. Electromagn. Res. C. 2010, 13, 171-185
- [19] Cheraghi, A.; Malekfar, R.; Bellah, S. M.; Parishani, M. "ISO-MANM: An Imitation Based Optimization Tool for Multilayer Microwave Absorbers"; J. Mol. Graph. Model. 2017, 72, 16-24.
- [20] Ranjan, P.; Choubey, A.; Mahto, S. K. "A Novel Approach for Optimal Design of Multilayer Wideband Microwave Absorber Using Wind Driven Optimization Technique"; AEU-Int. J. Electron. C. 2018, 83, 81-87.
- [21] Krusienski, D. J.; Jenkins, W. K. "Design and Performance of Adaptive Systems Based on Structured Stochastic Optimization Strategies"; IEEE Circ. Syst. Mag. 2015, 5, 8-20.

از سویی چون نتایج حاصل از این روش به‌طور مستقیم در انتخاب ماده جاذب و ضخامت آن نقش دارد لذا با تعیین مناسب این مقادیر، علاوه بر استفاده از وزن حداقل ماده جاذب، صرفه‌جویی بسزایی نیز در هزینه‌های جاری خواهد شد. این در حالی است که روش‌های موجود برای کاهش سطح مقطع راداری هزینه‌های مالی و زمانی زیادی را به‌خصوص تا رسیدن به نتایج مطلوب آزمایشگاهی به سیستم تحمیل می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مؤثر برای تعیین ضخامت بهینه لایه جاذب مایکروویوی جهت جلوگیری از شناسایی اهداف موردنظر (به‌خصوص در کاربردهای نظامی افندی و پدافندی) ارائه شد. برای تعیین ضخامت بهینه به ازای ۳۳ مورد از مشخصات فرضی مختلف جاذب‌ها با ضرایب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی مختلف مندرج در جدول (۱) و فرکانس‌های مختلف در بازه ۱۸-۲۰ GHz (باند‌های فرکانسی S(2-4 GHz), C(4-8 GHz), PSO تعیین شد. در مورد یک ماده نوعی برای استفاده عملی در نقش جاذب، میانگین‌گیری در باند فرکانسی موردنظر انجام شده و ضخامت بهینه میانگین تعیین گردید و بر اساس این ضخامت میانگین، میزان موج بازگشتی محاسبه شد و نتایج نشان داد که تعیین پارامترهای پوشش جاذب مایکروویوی در یک مقاومت صفحه‌ای مناسب و ضخامت بهینه تأثیر بسزایی در میزان جذب امواج دارد و بهترین بازدهی کمترین هزینه زمانی و مالی را در پی خواهد داشت.

۷. مراجع‌ها

- [1] Bozorgmehr, M.; Davoodi, A.; Khakbaz, M. R. "Investigation of X Frequency Microwave Absorbance of Ferrite Nano-Composite in Polyurethane Matrix"; Adv. Defence Sci. Technol. 2016, 7, 1-8 (In Persian).
- [2] Wang, G.; Gao, Z.; Wan, G.; Lin, S.; Yang, P.; Qin, Y. "High Densities of Magnetic Nanoparticles Supported on Graphene Fabricated by Atomic Layer Deposition and Their Use as Efficient Synergistic Microwave Absorbers"; Nano Res. 2014, 7, 704-716.
- [3] Salisbury, W. W. "Absorbent Body for Electromagnetic Waves"; Google Patents, 1952.
- [4] Fante, R. L.; McCormack, M. T. "Reflection Properties of the Salisbury Screen"; IEEE Trans. Antennas Propag. 1988, 36, 10, 1443-1454.
- [5] Engheta, N. "Thin Absorbing Screens Using Metamaterial Surfaces"; IEEE Int. Symp. Antennas Propag. 2002, 124-137.