



طراحی، پردازش و ارزیابی پوشش نانو لانتانیم آلومینات $LaAlO_3$ و جذب امواج الکترومغناطیسی بر اساس رنگ اپوکسی با الگوریتم بهینه‌سازی تقلیدمحور (ISO)

محمدرضا عبدالمجیدی^۱، علی حسنی جوشقانی^{۲*}، اکبر چراغی^۲، حسین مظاهری^۱

^۱گروه مهندسی شیمی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

^۲گروه نانو فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه علوم هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده: در این مقاله، برای طراحی و فراوری نانوپوشش‌های جاذب امواج الکترومغناطیس به بررسی عوامل مختلف در ایجاد خاصیت جذب امواج در رنگ‌های پلیمری پرداخته و موادی که در این زمینه به‌طور متداول استفاده می‌شود را، شناسایی شد. در انجام این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی تقلیدمحور (ISO) استفاده شده است. برای انجام این پژوهش، ابتدا انواع روش‌های جذب و بسامدهای راداری مورد استفاده استخراج و مشخص شد که با استفاده از تابش میدان‌های الکترومغناطیسی خارجی بر مواد چندسازه و لحاظ کردن شرایط مرزی امواج تابشی، می‌توان ساختار متفاوتی از مواد را مشاهده کرد. در این پژوهش، نمونه‌های رنگ اپوکسی و نانوپودر لانتانیم آلومینات به صورت کاربردی مورد پژوهش قرار گرفتند و با استفاده از دستگاه نتورک آنالیز درصد جذب این نمونه اندازه‌گیری شد که برای نمونه لانتانیم آلومینات تلفات بازتابش $13/8 -$ دسی بل، معادل ضریب جذب 83% به‌دست آمد.

واژگان کلیدی: مواد جذب‌کننده رادار (RAM)، رنگ اپوکسی، الگوریتم بهینه‌سازی تقلیدمحور (ISO)، نانوپوشش‌ها، جذب امواج الکترومغناطیس، نانو لانتانیم آلومینات ($LaAlO_3$)

a-hasani@iaau-arak.ac.ir

ali.hassani@iaau.ac.ir

امروزه با پیشرفت دستگاه‌های شناسایی الکترونیکی از قبیل رادار، قابلیت شناسایی و کشف اهداف توسط جنگ‌افزارهای زمینی و هوایی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بنابراین دستیابی به فناوری استتار در برابر امواج و تجهیزات رادار در حملات نیروهای دشمن، اهمیت فراوانی یافته دستیابی به علوم و فنون اختفا و استتار تجهیزات و ادوات جنگی، امری ضروری است [۱].

با توجه به موارد ذکر شده، تولید و استفاده پوشش‌های جاذب امواج میکروویو از چندین نظر مورد توجه قرار گرفته است:

- تولید پوشش‌های رادارگریز جهت استتار و اختفای تجهیزات و ادوات نظامی

۱- مقدمه

طیف الکترومغناطیسی، طیف گسترده‌ای از تمام بسامدهای احتمالی پرتوهای الکترومغناطیسی است. طیف الکترومغناطیسی هر جسم، نشانه پخش پرتوهای الکترومغناطیسی جذب شده و یا تولید شده توسط آن جسم است. گسترش طیف‌های الکترومغناطیسی به گونه‌ای است که از بسامدهای کم مورد استفاده در رادیوهای جدید گرفته تا پرتوهای گاما با طول موج کوتاه را در بر می‌گیرد و می‌تواند طول موج‌هایی را در هزاران کیلومتر دورتر تا کسری از اندازه اتم پوشش دهد. محدوده طول موج‌های بلند به اندازه جهان هستی است اما محدوده طول موج کوتاه در حد طول پلانک است.

- با توجه به اثرات زیان‌آور امواج میکروویو بر بافت‌های زنده، تهیه پوشش‌هایی جهت محافظت در برابر امواج میکروویو
- تهیه پوشش‌ها برای ساخت اتاقک‌های بدون پژواک [۲]
- تهیه پوشش‌ها برای محافظت از تجهیزات الکترونیکی در برابر امواج مزاحم [۳]

اساس تولید مواد جاذب امواج میکروویو استفاده از مواد هادی الکتریکی به همراه پرکننده‌های دی-الکتریکی و پرکننده‌های مغناطیسی است. این پرکننده‌ها در داخل ماتریس پلیمری پراکنده می‌شوند. طی سال‌های گذشته پژوهش‌های زیادی در زمینه نوع پرکننده‌ها و بهینه‌کردن ساختارها، صورت گرفته است که این نشان دهنده اهمیت موضوع است [۴-۶].

با استفاده از تابش میدانهای الکترومغناطیسی خارجی بر مواد چندسازه‌ی و لحاظ نمودن شرایط مرزی امواج تابشی، می‌توان ساختار متفاوتی از مواد را مشاهده کرد. در چنین شرایطی نتایج تغییر میدان‌های حاصله می‌تواند اثرات مهمی بر جذب انرژی (به دلیل وابستگی توان دوم جذب به شدت میدان الکتریکی) را به همراه داشته باشد. برای فریت‌ها با تلفات مغناطیسی قوی، علت جذب عمده تشدید فرومغناطیسی است. حال اگر مواد کربن‌دار مغناطیسی به عنوان جاذب میکروویو در نظر گرفته شود، علت جذب ناشی از تلفات دی‌الکتریک خواهد بود [۷].

مسئله مهم، حیاتی و قابل بررسی در نظریه مواد چندسازه تعیین خواص انتقال موثر آنهاست که به نسبت نیروهای متوسط شار به نیروهای متوسط گرادیان ارتباط دارد. بررسی‌های اخیر محققان این حوزه طیف وسیعی از روش‌های نظریه را برای حل این چالش بزرگ ارائه داده‌اند. شبیه‌سازی رایانه‌ای دقیق، مکملی برای تحلیل روش‌های نیمه تجربی است. در این روش‌ها، می‌توان از اشکال، ابعاد و حجم مختلف برای یک محیط دی‌الکتریک مختلط در هر محدوده طیف الکترومغناطیسی استفاده کرد. پارامترهای مشخص فیزیکی این گونه سیستم‌ها، به صورت عددی و قابل تغییر است. این پارامترها، قابلیت استفاده در طراحی‌ها و مواد چندمنظوره بهینه شده جدید را دارا هستند [۸].

پس، در بررسی و پژوهش در حوزه بازتابندگی ترکیبات مختلف و بر مبنای اولویت قراردادن بهترین خروجی‌ها نیاز است که ترکیبات موجود ساخته شده در این زمینه مورد ارزیابی قرار گیرد. پژوهش و بررسی نمونه‌های انتخابی براساس عملکرد ساختاری

حوزه فرآوری، سنتز، تولید به همراه الگوی مناسب لایه نشانی، اولویت لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، قطبش پذیری و زاویه فرودی موج تابشی می‌تواند گامی مهم در جهت داشتن بهترین جذب در محدوده‌ای وسیع است. از طرفی علاوه بر سنتز و فرآوری ترکیبات مختلف این حوزه، نیازمند است یک معیار و سنجش مناسبی از لحاظ جذب و بازتابندگی با استفاده از دستگاه‌های حوزه مخابراتی (تحلیلگر شبکه) صورت پذیرد. لذا با استفاده از مقالات و مراجع موجود در این حوزه و انجام روند آزمون‌ها و آزمایش‌های منطبق با علوم و فناوری نانو مواد، می‌توان به این مهم دست یافت.

بهره‌برداری از مواد جاذب رادار در سال ۱۹۳۰ مدت کمی بعد از پیدایش رادار شروع شد [۵]. در طراحی این جاذب‌ها موادی با مکانیسم اتلافی مختلف شرکت کرده و از فیزیک نوری برای بهینه‌سازی جذب در یک باند وسیع بسامدی استفاده می‌گردید. بنابراین، جاذب‌ها در اشکال و ساختارهای مختلف نظیر ساختارهای هرمی ضخیم، روکش‌های چند لایه و تک لایه‌ای ساخته شدند. اولین اختراع در سال ۱۹۳۶ در هلند به ثبت رسید. در این جاذب‌ها که از نوع تشدیدی بودند، کربن سیاه به عنوان ماده اتلافی و دی‌اکسیدتیتانیوم با ضریب دی‌الکتریک بالا برای افزایش تلفات مورد استفاده قرار گرفتند. ماده اتلافی به موادی اطلاق می‌شود که با پخش امواج الکترومغناطیسی یا صوتی در خود قادر به تضعیف این امواج هستند. در طول جنگ جهانی دوم آلمان برای استتار زیر دریایی‌هایش در برابر رادار از موادی به نام وسچ استفاده می‌کرد. وسچ روکشی به ضخامت ۳ اینچ بود که از کربن به عنوان پرکننده در داخل لاستیک ساخته شده بود. این روکش در بسامد ۳ گیگاهرتز به کار برده میشد. آلمانی‌ها همچنین جاذب‌هایی تولید کردند. این جاذب‌ها دارای ضخامتی حدود ۳ اینچ بودند، که مقاومت الکتریکی در آنها به صورت نمایی از سمت هوا به فلز کاهش می‌یافت. این جاذب‌ها باعث کاهش انعکاس‌هایی در حدود ۲۰- دسی‌بل استفاده شده بود [۹].

پژوهش‌های علمی راجع به فریت‌ها از اواسط قرن نوزدهم آغاز شد. پس از جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۴۶ شخصی به نام اسنوک^۱ وجود ماده‌ای مغناطیسی از نوع سرامیک (فریت) را با

¹ Snok

دسی بل (جذبی معادل ۹۷٪) بود. پهنای باند جذبی حاصله برابر با ۳ گیگا هرتز بود. مقادیر انعکاس اتلافی با افزایش ضخامت به سمت بسامدهای پایین تر جابجا می شد. آنها همچنین چندسازه‌های از تیتانات باریم، پلی‌آنیلین و کربن هادی در ماتریکس پلی‌یورتان تهیه کردند. یکی از چندسازه‌ها شامل تیتانات باریم و پلی‌آنیلین سنتزی و چندسازه بعدی شامل تیتانات باریم و پلی‌آنیلین تجاری بود [۱۲].

چندسازه سنتزی جذبی حدود ۹۹٪ را در ۱۱/۲ گیگا هرتز نشان میداد، این مقدار در مقایسه با چندسازه تجاری دارای نتایج بهتری بود. چندسازه سنتزی، تلفات انعکاسی برابر با ۲۵-دسی بل نشان می داد. در حالی که تلفات انعکاس چندسازه تجاری، برابر با ۱۰- دسی بل بود. پس چندسازه سنتزی در ایجاد پوشش الکترومغناطیسی عملکرد بهتری داشت، که این مسئله به علت وجود ناخالصی در اجزای سازنده چندسازه تجاری بود.

لیو و همکارانش، از چین در سال ۲۰۱۲، نانوچندسازه با پرکننده‌های اکسیدگرافن، فریت منیزیم و پلی وینیل یدین فلورید سنتز کردند. در این پژوهش، چندسازه‌هایی با ترکیب فریت منیزیم/واکس، اکسید گرافن /فریت منیزیم/واکس و اکسید گرافن /فریت منیزیم/پلی وینیلیدین فلورید سنتز شد و مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب اکسید گرافن/فریت منیزیم/پلی وینیل یدین فلورید حاوی ۵ درصد وزنی از هر پرکننده بهترین نتیجه را دارد. این نمونه در بسامد ۲/۹ گیگاهرتز اتلافی معادل ۲۹- دسی بل داشت سو و همکارانش در دانشگاه تسینگ-هوا تایوان نانوچندسازه با بستر پلی‌آنیلین و پرکننده گرافن سنتز کردند. در این پژوهش، بر سطح گرافن درصدهای وزنی مختلف از نانوذرات نقره و در سری بعد بر روی سطح گرافن با همان درصدهای وزنی نانوذرات نیکل تثبیت شد [۱۰].

نانوچندسازه‌هایی حاوی انواع پرکننده‌ها در بستر پلی‌آنیلین سنتز شد و مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعات نشان داد که نانوچندسازه با پرکننده‌ی گرافن- نقره با ۵٪ وزنی نقره بیشترین اتلاف را دارا است. این نانوچندسازه اتلافی برابر با ۳۳/۲۹- دسی بل نشان داد، که نشان‌دهنده جذب ۹۹ درصدی امواج است. دانشمندان در سال ۲۰۲۱، نانوچندسازه شامل اکسید گرافن تک لایه در بستر رزین اپوکسی را تهیه کردند. نمونه با ۳ درصد

خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالا، مقاومت الکتریکی خوب و تلفات هدایتی کم جهت استفاده در رادارها کشف و در سال ۱۹۴۷ نتیجه پژوهشات خود را منتشر کرد. در سال ۱۹۴۸ شخصی به نام لی نیل نظریه خود را بر مبنای فری مغناطیس ارائه داد. پس از آن پژوهشات مغناطیس بر اساس فریت‌ها گسترش یافت و دانشمندان دیگر توانستند ترکیبات مختلفی از مخلوط اکسیدهای آهن، نیکل، منگنز و روی را مورد آزمایش قرار دهند و به نتایج بسیار مطلوبی از نظر مقاومت الکتریکی بالا در مقایسه با فلزات دست یابند. با وجود اینکه آلیاژهای مغناطیسی و سامانه‌های فلزی نظیر آهن و دیگر مواد فرومغناطیس، بالاترین ضریب نفوذپذیری مغناطیسی را در حدود ۱۰۰۰۰۰ دارا هستند اما به دلیل مقاومت الکتریکی پایین، امکان استفاده از آنها در بسامدهای بالاتر از ۱ کیلوهرتز عملاً میسر نیست [۱۰].

دانشمندان در سال ۲۰۱۸، از الیاف کربنی بافته شده، پلی‌آنیلین و پلی‌یورتان برای بررسی جذب امواج میکروویو در گستره باند ایکس استفاده کردند. با این روش جذبی انعطاف‌پذیر با مقادیر جذبی نزدیک به ۸۷٪ به دست آمد. مواد دی‌الکتریک تهیه شده در این کار خواص جالبی مثل انعطاف‌پذیری، وزن سبک و همچنین، شکل‌پذیری (در هواپیما) را نشان دادند. از ویژگی‌های دیگر این جاذب داشتن جرم مخصوص پایین بود. از این روکش می‌توان برای سپر سازی در برابر امواج الکترومغناطیسی و نیز جاذب امواج میکروویو استفاده کرد [۴].

در سال ۲۰۲۱، تاثیر جذب و سپر سازی امواج میکروویو بر روی چندسازه‌های مختلف پلی‌آنیلین در گستره ۵۰ مگا هرتز تا ۱۱۰ گیگا هرتز مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی مقدار سپر سازی امواج میکروویو از ۱۰- دسی بل به ۷۰- دسی بل با تغییر درصد وزنی پلی‌آنیلین از ۱۰ به ۴۰ افزایش یافت [۹].

اباس و همکارانش، چندسازه تیتانات باریم^۲ و پلی‌آنیلین با نسبتی مختلف را در رزین پلی‌یورتان تهیه نمودند. از تیتانات باریم به عنوان پرکننده فروالکتریک استفاده شد. مقدار جذب در چندسازه با افزایش میزان پلی‌آنیلین افزایش نشان می‌داد و بیشترین میزان تلفات انعکاس در ۱۰ گیگاهرتز برابر با ۱۵-

² BaTiO

وزنی از اکسید گرافن در ارزیابی‌ها، ائتلافی برابر با ۳۸- دسی‌بل را نشان داد. این نمونه جذبی نزدیک به ۹۹/۹٪ برای امواج را دارا بود [۵]. شایان ذکر است که نمونه مشابهی درباره ضریب جذب سیستم رنگ سه لایه بر پایه اپوکسی و لاتنانیم آلومینات تا کنون انجام نپذیرفته است.

۲-نانو مواد

فناوری نانو به سه سطح قابل تقسیم است: مواد، ابزارها و سامانه‌ها. موادی که در سطح نانو در این فناوری به کار می‌رود را نانومواد می‌گویند. موادی که حداقل یکی از ابعاد آنها در مقیاس ۱ الی ۱۰۰ نانومتر باشد، مواد نانویی یا نانو مواد خوانده می‌شوند. منظور از یک ماده‌ی نانو ساختار، جامدی است که در سراسر بدنه آن انتظام اتمی بلورهای تشکیل دهنده و ترکیب شیمیایی در مقیاس چند نانومتری گسترده شده باشند. در حقیقت این مواد متشکل از بلورها یا دانه‌های نانومتری هستند که هر کدام از آنها ممکن است از لحاظ ساختار اتمی، جهات تبلور یا ترکیب شیمیایی با یکدیگر متفاوت باشند. همه مواد از جمله فلزات، نیمه‌هادی‌ها، شیشه‌ها، سرامیک‌ها و پلیمرها در ابعاد نانو می‌توانند وجود داشته باشند. همچنین محدوده فناوری نانو می‌تواند به صورت ذرات بی شکل (آمورف^۳)، بلوری، آلی، غیرآلی و یا به صورت منفرد، مجتمع، پودر، کلوئیدی^۴، سوسپانسیون^۵ یا امولسیون^۶ باشد. در این پژوهش از نانو پودر سنتزی مطابق با استفاده از روش تعامل حالت جامد و شوک حرارتی تهیه شده، استفاده شده است [۳].

۱-۲ - روش

در این پژوهش، از الگوریتم بهینه‌سازی تقلیدمحور به عنوان روش پیشنهادی استفاده شده است. در ادامه در قالب سه بخش به تشریح الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود. در اولین بخش به تشریح ویژگی‌های ذاتی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پرداخته خواهد شد [۳]. تشریح روش پیشنهادی الگوریتم

³ Amorphous

⁴ Colloid

⁵ Suspension

⁶ Emulsion

بهینه‌سازی تقلیدمحور و آخرین بخش به طریقه حل مسئله نانومواد جاذب راداری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تقلیدمحور را میتوان از طریق مقاله چراغی که در آن برنامه با ابزار جاوا اجرایی شده است، به تفصیل مطالعه کرد [۵]. شایان ذکر است که پس از استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور، بهترین حالت برای ساختار یک پوشش سه لایه‌ای جاذب امواج الکترومغناطیس را بدست خواهیم آورد.

مطالب مربوطه نشان دهنده یک عضو جمعیت است که دارای دو موقعیت جاری و موقعیت (Lbest بهترین موقعیتی که توسط خود عضو دیده شده است) می‌باشد. ستون‌ها نشان دهنده خصوصیات ساختار نانومواد جاذب راداری 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 اعضا در جمعیت (تعداد ساختار) ANM با K نشان داده می‌شود.

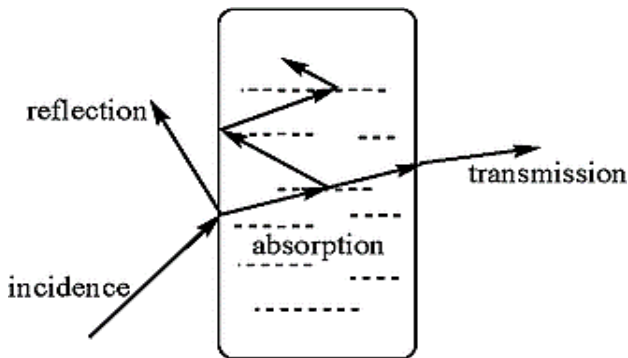
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام تقلید محور با استفاده از روابط مربوطه به تعداد max-generation بار نسل جدید تولید می‌کند، این بدان معنی است که به تعداد max-generation تولید می‌شود، که در هر بار تولید، اعضا سعی میکنند تا برازش خود را بیشتر کنند. در نهایت gBest نسل نهایی به عنوان نتیجه نهایی به کاربر نشان داده می‌شود که بدین وسیله بهترین حالت از سیستم پوششی رنگ سه لایه بر اساس اپوکسی و لاتنانیم آلومینات به ضخامت مد نظر بدست آمد [۱۶].

۲-۲-جاذب میکروویو چند لایه

به طور کلی یک جاذب میکروویو چند لایه بوسیله ترکیبی از مواد جاذب مختلف به منظور بالابردن ویژگی‌های کلی جذب توصیف می‌شود. همان طور قبلاً به اختصار گفته شد، یکی از موضوعات اصلی برای طراحی چنین جاذب‌هایی نحوه به کمینه‌رساندن ضریب بازتابندگی کلی در یک محدوده بسامدی خاص و یک محدوده خاصی از زوایای فرودی است. انتظار می‌رود، لایه جلویی بهترین تطبیق امپدانس را داشته باشد، در صورتی که لایه جذب

زمانی که امواج الکترومغناطیسی مطابق شکل ۱، به یک جسم برخورد می‌نماید، سه رویداد در تضعیف این امواج نقش دارند که عبارتند از:

میرایی ناشی از جذب توسط ماده^۸ (SA)،
میرایی در اثر بازتابش^۹ (SR)،
تضعیفی که در اثر بازتاب‌های پی در پی داخلی صورت می‌گیرد^{۱۰} (SMR) [۸].



EM wave absorption material
شکل ۱: امواج فرودی، امواج بازتابی و امواج جذبی [۱۴]

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معادلات و فرمول‌های ریاضی

محیط‌های همگن و ناهمگن بوسیله یک محیط موثر با دو پارامتر توصیف می‌شود. پارامتر ضریب گذردهی الکتریکی مختلط (ε) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مختلط (μ) و به صورت روابط ۱ و ۲ بسط داده می‌شود [۱۵].

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

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

که در آن ε' و μ' به ذخیره انرژی و ε'' و μ'' به اتلاف دی‌الکتریک ارتباط دارد. این پارامترها در قبال محیط‌های همگنی، تشدید و رسانا مقادیر مختلفی را به خود می‌پذیرند. تاثرات تلفات از مواد دی‌الکتریک به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۱۰].

قرار است، انرژی میکروویو را تا حد ممکن هدر دهد (از بین ببرد) [۶].

از طرفی انتظار می‌رود، زیرلایه از هرگونه بازتابندگی امواج میکروویو جلوگیری کند. محققان، ساختار دولایه‌ای از چندسازه اپوکسی-شیشه با دو نوع محتوای خانواده کربنی پیشنهاد دادند. به‌هرحال، نمایش ناموفق جاذب تک لایه‌ای (از لحاظ میزان و پهنای جذب) منجر به استفاده از جاذب‌های چند لایه‌ای با ضخامت یکسان و بهینه‌سازی در محتوا می‌شود. یک ساختار چندلایه‌ای شامل ورقه فیبری آغشته به رزین حساس به دما (مانند پلیمر الیاف شیشه ای تقویت شده^۷، یک ورقه لاستیکی از کربن سیاه و یک ورقه رزین تقویت شده (مانند چندسازه تقویت شده با الیاف کربنی) به عنوان یک جاذب میکروویو کارا پیشنهاد شده است [۱۵]. این چنین ساختاری دارای دو مزیت اصلی می‌باشد: اولاً، لایه سطحی می‌تواند به عنوان لایه تطبیقی برای بهبود جذب و نیز برای کاهش ضخامت کلی جاذب عمل کند. ثانیاً، امکانات زیادی را برای بهینه‌سازی ویژگی‌های جذب امواج میکروویو در دسترس قرار می‌دهد. برای مثال، با یک ساختار دولایه‌ای شامل کربونیل آهن و کربن سیاه (به ترتیب)، می‌توان خصیصه‌های جاذب میکروویو را بوسیله پارامترهای مختلفی از هر لایه (میزان پرکننده و نسبت ضخامت) تنظیم کرد [۵].

۳-۲- نظریه می

اگرچه پدیده جذب در محدوده میکروویو از دهه‌های قبل شناخته شده و دلایل فرایند جذب نیز رابطه‌بندی شده است، اما طراحی جاذب‌ها، فکر و ذهن بسیاری از دانشمندان علوم متفاوت و مهندسان را به خود مشغول کرده است. زمانی که یک موج الکترومغناطیسی به یک ماده پراتالاف پراکنده برخورد می‌کند، در اثر اندرکنش نور با ماده، بخشی از نور عبور، بخشی جذب و بخشی بازتاب می‌شود. موج الکترومغناطیسی شامل یک جزء مغناطیسی و یک جزء الکتریکی است که بر هم عمود هستند و نسبت به صفحه‌ای که شامل هر دو جزء است منتشر می‌شود. انرژی الکترومغناطیسی تنها شکلی از انرژی است که می‌تواند به طور موثر در انتقال سیگنال‌های هوشمند از فاصله‌های دور و در فضای آزاد و تحت شرایط کنترل شده مورد استفاده قرار گیرد.

⁸ Surface Absorption

⁹ Surface Reflection

¹⁰ Surface Multi Reflection

⁷ Glass-Fiber Reinforced Concrete

معمولاً $1 \ll \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu\epsilon}$ ، بنابراین ضخامت d خیلی کمتر از طول موج و همچنین ϵ کوچک است. لذا معادله بالا به صورت رابطه ۷ اصلاح می‌شود [۱۸].

$$j \frac{2\pi f d}{c} (\mu' - j\mu'') = 1 \quad (7)$$

در نتیجه:

$$\mu' = 0 \quad \text{و} \quad \mu'' = \frac{c}{2\pi f d}$$

آنگاه بسامد تطبیق (f_m) به صورت رابطه ۸ خواهد شد:

$$f_m = \frac{c}{2\pi d \mu''} \quad (8)$$

برای داشتن جذب، بسامد تطبیق (f_m) باید با بسامد تشدید طبیعی جسم (f) برابر باشد. بسامد تشدید طبیعی جسم (با خاصیت مغناطیسی) با رابطه ۹ نوشته می‌شود [۱۶]:

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} H_a \quad (9)$$

که در آن $2.8 \text{ MHz/Oe} = \gamma/2\pi$ و $10e = (10^3/4\pi) A/m$ می‌باشد. γ ، ثابت ژیرومغناطیسی و نیروی مغناطیسی ناهمسانگرد H_a ، به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود [۸ و ۱۳]:

$$H_a = \frac{2|K_1|}{\mu_0 M_s} \quad (10)$$

که در آن K_1 ثابت ناهمسانگردی و M_s مغناطش اشباع هنگامی که ماده فرومغناطیس در میدان مغناطیسی خارجی بسیار $H_a = \frac{2|K_1|}{\mu_0 M_s}$ قوی قرار می‌گیرد، درصد بالایی از دوقطبی‌های مغناطیسی هم‌راستای میدان خارجی شده و حجم حوزه‌های هم‌راستا با میدان خارجی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مغناطیس اشباع بزرگتر (یا میدان ناهمسانگرد کوچکتر) منجر به بسامد تشدید و همچنین باعث بهبود پهنای نوار جذب می‌شود [۱۷].

به طور معمول با بزرگتر شدن ϵ'' مقدار $\tan \delta$ نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، با داشتن بهترین حالت ϵ'' و تانژانت تلفات، انتظار رسیدن به بهترین شرایط جذب پیش‌بینی می‌شود و ϵ'' کوچک یا بزرگ به تنهایی موید جذب خوب نیست و ثابت

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (3)$$

تلفات انرژی در یک ماده بوسیله امواج الکترومغناطیسی فرودی از طریق عمل نیروهای میرا روی اتم‌ها و مولکول‌های قطبیده شده و رسانندگی مواد محاسبه می‌شود. این روند در الکترومغناطیس بوسیله قضیه پوینتینگ مطابق روابط ۴، ۵ و ۶ بیان می‌شود. در حالتی که بخشی از توان کل (برای یک میدان الکترومغناطیس همگن و بسامد زاویه ای (ω) ، در داخل حجم V و سطح S ، به انرژی ذخیره شده و انرژی جذب مرتبط است. [۱۵].

$$u = \left[\epsilon_0 \frac{d(\omega\epsilon)}{d\omega} \langle |E|^2 \rangle + \mu_0 \frac{d(\omega\mu)}{d(\omega)} \langle |H|^2 \rangle \right] \quad (4)$$

(

$$S = E \times H \quad (5)$$

(

که در آن، S بردار پوینتینگ، ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی در فضای آزاد و μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فضای آزاد است. مقدار J به رسانندگی و تلفات دی‌الکتریک دلالت دارد. مشاهده می‌شود، رسانندگی و تلفات دی‌الکتریک با حرارت تولید شده، قابل تشخیص ناست. با استفاده از تابش میدان‌های الکترومغناطیسی خارجی بر مواد چندسازه و لحاظ نمودن شرایط مرزی امواج تابشی، می‌توان ساختار متفاوتی از مواد را مشاهده کرد. در چنین شرایطی نتایج تغییر میدان‌های حاصله، می‌تواند اثرات مهمی بر روی جذب انرژی (به دلیل وابستگی توان دوم جذب به شدت میدان الکتریکی) به همراه داشته باشد [۷ و ۸].

در اینجا مشاهده می‌شود که ثابت میرایی به ضریب گذردهی الکتریکی مختلط، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مختلط و بسامد وابسته است [۱۱].

برای فریت‌ها با تلفات مغناطیسی قوی، علت جذب عمداً تشدید فرومغناطیسی است. فرومغناطیسی‌ها موادی هستند که در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، گشتاور مغناطیسی دارند. برای داشتن کمینه تلفات بازتابندگی مطابق رابطه ۵ باید شرایط رابطه ۶ اقلان شود [۱۶].

$$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh \left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu\epsilon} \right) = 1 \quad (6)$$

همانطور که در جدول ۱ مشخص است، برنامه برای سامانه سه لایه‌ای پوششی در گام اول رنگی با پایه اپوکسی و نانو ماده لاتانیم آلومینات با ضخامت ۸/۳۴ میلیمتر پیشنهاد داده است. در لایه بعدی رنگ پایه اپوکسی با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و در لایه آخر رنگ پایه اپوکسی و نانوماده لاتانیم آلومینات با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر قرار دارد. این بدین معناست که سه لایه پوشش به صورت جداگانه بعد از طی شدن زمان پخت هر کدام و در شرایط مناسب باید بر روی هم اجرا شوند تا بتوان به میزان جذب مورد اشاره در شکل‌های ۳ و ۴ برسیم.

میرایی α مربوط به رابطه ۴ به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ خواهد شد [۱۴].

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{-\varepsilon' + \sqrt{(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)}} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\varepsilon'' \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} - \frac{1}{\tan \delta}} \right)} \quad (12)$$

۳-۲- تجزیه و تحلیل نتایج

حال که تمامی روابط را مورد ارزیابی قرار دادیم با استفاده از برنامه مورد اشاره در بخش پیش، که بر اساس سامانه ISO نوشته شده است، سعی می‌کنیم بهترین حالت سامانه پوششی با استفاده از نمونه‌های موجود را بیابیم. با استفاده از مقادیر آزمایشاتمان که پارامترهای جذب را برای ما به نمایش گذاشته‌اند یک پایگاه داده برای برنامه ISO ایجاد کرده و شروع به بهینه‌سازی می‌کنیم.

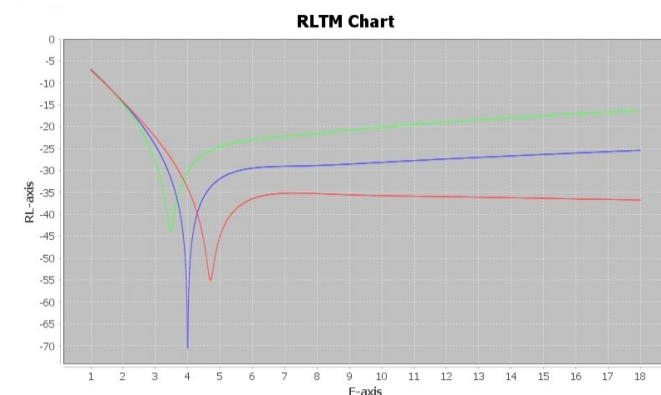
باید توجه داشت که این عمل به این خاطر صورت می‌گیرد که بتوانیم توان سامانه‌های مختلف در جذب را بسنجیم و با یکدیگر مقایسه کنیم. ضخامت لایه‌های هر کدام از سامانه‌ها را در محدوده ۱۰۰ میکرومتر تا ۱۰ میلیمتر انتخاب می‌کنیم و از برنامه جهت یافتن بهترین حالت‌ها کمک می‌گیریم.

۳-۳- سناریو پایه: سامانه پوششی سه لایه‌ای:

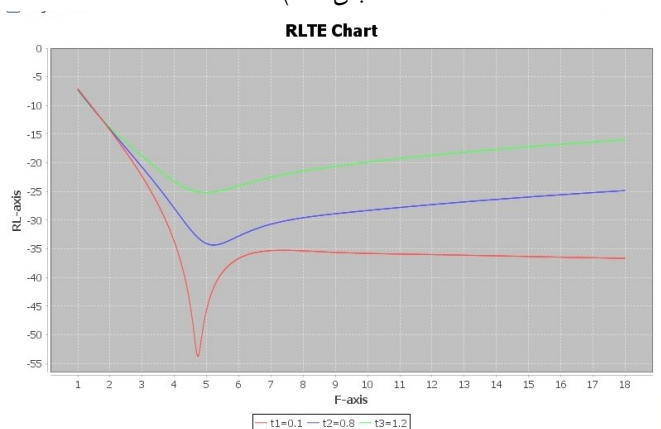
در این حالت با استفاده از پایگاه داده‌های موجود حالتی را در نظر می‌گیریم که تنها سه لایه پوششی از میان نمونه‌های موجود ما انتخاب شود. روش بهینه‌سازی ISO این امکان را به ما می‌دهد که بهترین سه لایه‌ای موجود را بیابیم که میزان جذب امواج الکترومغناطیس آن در بالاترین حالت ممکن باشد.

جدول ۱: سامانه سه لایه پوششی

No of Layer	ID	Material	Dimension(mm)
1	1	EP+LaAlO3	0.15
2	5	EP	0.1
3	3	EP+LaAlO3	8.34521354

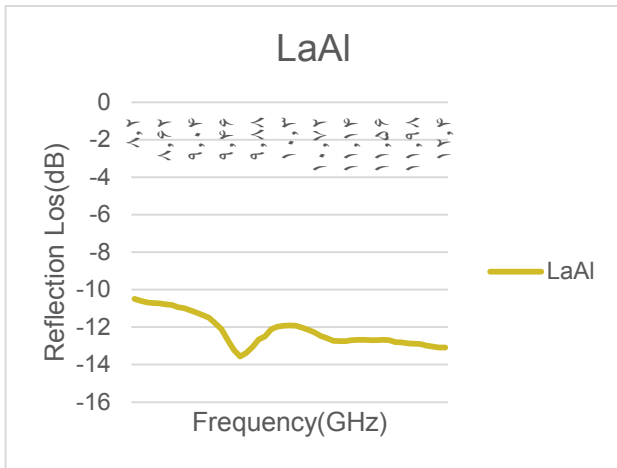


شکل ۳: میزان تلفات بازتابندگی مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO) در زوایای رنگ سبز 70° ، رنگ آبی 50° و رنگ قرمز 10° با قطبش (TM)



شکل ۴: میزان تلفات بازتابندگی مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی تقلید محور (ISO) در زوایای رنگ سبز 70° ، رنگ آبی 50° و رنگ قرمز 10° با قطبش (TE)

شکل‌های ۳ و ۴، میزان تلفات بازتابندگی در سه زاویه 10° و 50° و 70° درجه را نمایش می‌دهد. شکل ۳ شاخص جذب را در قطبش TM در محدوده بسامدی ۱ تا ۱۸ گیگاهرتز نشان داده است و همانطور که در شکل پیدا است این جذب با بیشینه (۴۵-

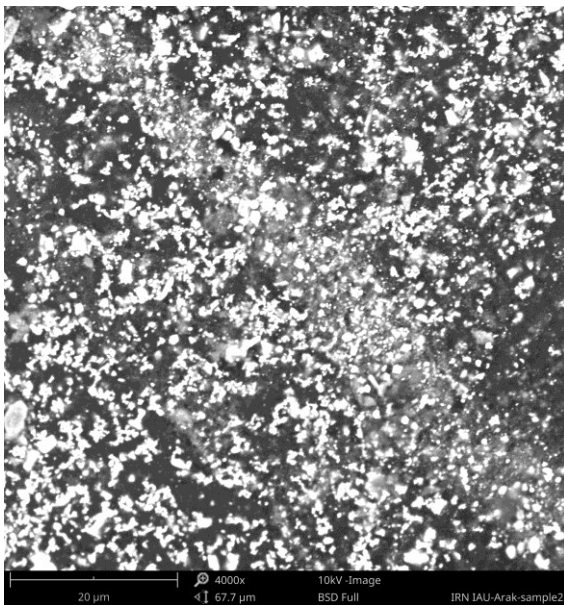


شکل ۶: تلفات بازتاب بر فرکانس پوشش اپوکسی و نانو لاتانتیم آلومینات

دسی‌بل) در زاویه ۱۰ درجه و (۱۵- دسی‌بل) در زاویه ۵۰ درجه و (۸- دسی‌بل) در زاویه ۷۰ درجه را نمایش می‌دهد.

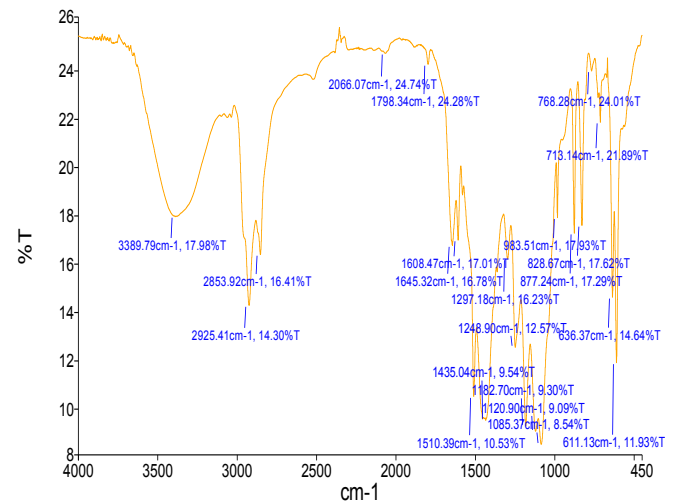
در شکل ۴، میزان تلفات بازتابندگی با قطبش TE مشاهده می‌کنیم که در محدوده بسامدی ۱ تا ۱۸ گیگاهرتز این جذب با بیشینه (۴۰- دسی‌بل) در زاویه ۱۰ درجه و (۱۴- دسی‌بل) در زاویه ۵۰ درجه و (۷- دسی‌بل) در زاویه ۷۰ درجه را نمایش می‌دهد.

با استفاده از دستگاه تست آنالیز مادون قرمز فوریه^{۱۱} نمونه پوشش اپوکسی و نانو پودر لاتانتیم آلومینات ساخته شده را مطابق با شکل ۵ بدست آوردیم.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از نمونه رنگ اپوکسی و نانوذرات لاتانتیم آلومینات

در این پژوهش، از نانوذرات لاتانتیم آلومینات برای به دست آوردن گردش یکنواخت در شبکه پوششی استفاده شده است. از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM برای بررسی چینش نانوذرات در شبکه پوششی استفاده شده است (شکل ۷). این در شکل ۷ آشکار است که نانوذرات به طور مداوم توسط پوشش اپوکسی در بافت پراکنده شده‌اند. وسعت طبیعی ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر بوده است که نشان می‌دهد ذرات پوشش مناسبی داشته‌اند.



شکل ۵: تست آنالیز فروسرخ تبدیل فوریه پوشش اپوکسی و پودر نانو لاتانتیم آلومینات

همچنین، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ضریب جذب این پوشش را بر حسب تلفات بازتاب بر فرکانس مطابق شکل ۶ بدست آوردیم.

¹¹ FTIR

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی جاذب‌های میکروویو چند لایه‌ای، به کمینه رساندن ضریب بازتاب از یک موج فرودی در یک ساختار برای محدوده مشخصی از زوایا و بسامدها مهم است. برای کم مشاهده‌پذیری ماده از جمله هواپیماهای نظامی از دید رادارها از فناوری رادارگریزی استفاده می‌شود. در این پژوهش تلاش کرده شد تا مواد چندسازه را از طریق تکنیک بهینه‌سازی ISO با آرایشی متناسب برای بدست آوردن بهترین حالت جذب امواج الکترومغناطیس استفاده کنیم. نانو پرکننده لاتنانیم آلومینات با فرمول شیمیایی LaAlO با اندازه مولکول طبیعی ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر در شبکه اپوکسی حل شده و سپس خواص مختلف چندسازه‌ها را بررسی کردیم. در انتها نتایج ذیل با استفاده از این پژوهش بدست آمده است:

- (۱) پرکننده‌ی اندازه‌گیری شده با نانو و بستر پوشش اپوکسی باعث نگهداری هیدروژن می‌شوند.
- (۲) با تصاویر SEM مشاهده می‌شود که آزمایش‌های رنگ، شبکه و پرکننده پیوند قابل قبولی از چندسازه‌ها در بین آنها ایجاد شده است.
- (۳) تنظیم طیف FTIR هیچ تغییر مصنوعی در چندسازه‌های نمونه یافت نمی‌شود، تغییرات فشار و تأثیر اتصال زیادی را در بین آزمایش‌های رنگ، شبکه و مواد پرکننده نشان می‌دهد.
- (۴) بر اساس ترتیب نمونه‌های ما، یک بررسی سازمانی در محدوده تکرار ۸-۱۴ (گیگاهرتز) انجام شده است و نتایج انعکاسی عبارت است از سامانه سه لایه‌ای پوششی در گام اول رنگی با پایه اپوکسی و نانو ماده لاتنانیم آلومینات با ضخامت ۸/۳۴ میلی‌متر پیشنهاد داده است. در لایه بعدی رنگ پایه اپوکسی با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و در لایه آخر رنگ پایه اپوکسی و نانو ماده لاتنانیم آلومینات با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر قرار دارد. این بدین معناست که سه لایه پوشش به صورت جداگانه بعد از طی شدن زمان پخت هر کدام و در شرایط مناسب باید بر روی هم اجرا شوند که با استفاده از دستگاه نتورک آنالیز درصد جذب این نمونه اندازه‌گیری شد که برای نمونه لاتنانیم آلومینات تلفات بازتابش ۱۳/۸- دسی بل، معادل ضریب جذب ۸۳٪ به دست آمد.

جاذب‌های رادار می‌توانند اشیاء را غیرقابل شناسایی کنند، در حالی که جاذب‌های راداری می‌توانند به طور کلی بخش متقاطع راداری موارد را در فرکانس‌های خاص کاهش دهند.

مراجع

- [1] P. Das, S. Ganguly, I. Perelshtein, S. Margel, A. Gedanken, "Acoustic green synthesis of graphene-gallium nanoparticles and PEDOT: PSS hybrid coating for textile to mitigate electromagnetic radiation pollution," ACS applied nano materials, 5.1, 1644-1655, 2022.
- [2] S. A. Hashemi, S. M. Mousavi, M. Arjmand, N. Yan, U. Sundararaj, "Electrified single-walled carbon nanotube/epoxy nanocomposite via vacuum shock technique: Effect of alignment on electrical conductivity and electromagnetic interference shielding," Polymer composites, 39.S2, E1139-E1148, 2018.
- [3] S. Ganguly, P. Das, A. Saha, M. Noked, A. Gedanken, S. Margel, "Mussel-Inspired polynorepinephrine/MXene-Based magnetic nanohybrid for electromagnetic interference shielding in X-Band and strain-sensing performance," Langmuir, 38, 3936-3950, 2022.
- [4] A. Olad, S. Shakoori, "Electromagnetic interference attenuation and shielding effect of quaternary Epoxy-PPy/Fe₃O₄-ZnO nanocomposite as a broad band microwave-absorber," Journal of magnetism and magnetic materials, 458, 335-345, 2018.

- [11] Z. Su, S. Yi, W. Zhang, L. Tian, Y. Zhang, S. Zhou, B. Niu, D. Long, "Magnetic-Dielectric complementary Fe-Co-Ni alloy/carbon composites for high-attenuation C-band microwave absorption via carbothermal reduction of solid-solution precursor," *Advanced electronic materials*, 12, 2201159 (1-11), 2022.
- [12] H. Yoon, "current trends in sensors based on conducting polymer nanomaterials," *Nanomaterials*, 3, 524–549, 2013.
- [13] A. Kumar, V. Agarwala, D. Singh, "Effect of milling on dielectric and microwave absorption properties of SiC based composites," *Ceramics international*, 40, 1797-1806, 2014.
- [14] Y. Liu, C. Ji, L. Lu, J. Xu, X. Su, "Facile synthesis and electromagnetic wave absorption properties of silver coated porous carbon composite materials," *Journal of alloys and compounds*, 856, 75-84, 2021.
- [15] M. Abdolmajidi, A. Cheraghi, A. Hassani Joshaghani, H. Mazaheri, "Design, processing and evaluation of CuO, MgO and TiO₂ nano-coatings absorbing electromagnetic waves based on epoxy paint," *nano-structures & nano-objects* 32, 100911, 2022.
- [16] A. Cheraghi, R. Malekfar, S. Moemen Bellah, M. Parishani, "ISO-MANM: An imitation based optimization tool for multilayer microwave absorbers," *Journal of molecular graphics and modelling*, 72, 16-24, 2017.
- [5] S. Ganguly, N. Kanovsky, P. Das, A. Gedanken, S. Margel, "Photopolymerized thin coating of polypyrrole/graphene nanofiber/iron oxide onto nonpolar plastic for flexible electromagnetic radiation shielding, strain sensing, and non-contact heating applications," *Advanced materials interfaces*, 8.23, 2101255.125-134, 2021.
- [6] F. Qin, C. Brosseau, "A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles," *Journal of applied physics*, 111, 061301, 2012.
- [7] T. Haritha, K. Ramji, Ch. Subrahmanyam, K. Krushnamurthy, P. S. Nagasree, "Microwave-absorption characteristics of polyaniline-coated multiwalled carbon nanotube composites," *Plastics, rubber and composites*, 50:4, 180-188, 2021.
- [8] M. Danesh, H. Beheshti, M. Heidari-Rarani, "Optimal design of broadband radar-absorbing composite structures based on different compositions, processing, and geometric parameters," *Journal of reinforced plastics and composites*, 58-62, 2022.
- [9] A. Cheraghi, R. Malekfar, Y. Ahmadizadeh, S. Momenbelah, "Modeling of multi-layer microwave absorber structures for radar cross section," *Journal of aeronautical engineering*, 18(2), 16-25, 2021.
- [10] Q. Liu, B. Cao, C. Feng, W. Zhang, S. Zhu, D. Zhang, "High permittivity and microwave absorption of porous graphitic carbons encapsulating Fe nanoparticles," *Composites science and technology*, 72, 1632–1636, 2012.

- [17] M. A. Almessiere, Y. Slimani, A. V. Trukhanov, A. Sadaqat, A. D. Korkmaz, N. A. Algarou, H. Aydın, A. Baykal, M. S. Toprak, “Review on functional bi-component nanocomposites based on hard/soft ferrites: structural, magnetic, electrical and microwave absorption properties,” *Nano-structures & nano-objects*, 26, 100728, 2021.



Design, processing and evaluation of lanthanum aluminate (LaAlO₃) nano coating and absorption of electromagnetic waves based on epoxy paint with imitation-based optimization algorithm (ISO)

M. Abdolmajidi¹, A. Hassani Joshaghani^{1,*}, A. Cheraghi², H. Mazaheri¹

¹Department of Chemical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

²Department of Basic Sciences, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, for the design and processing of electromagnetic wave absorbing nano coatings, various factors have studied in creating the property of absorbing waves in polymer paints and identified the materials that are commonly used in this field. In this research, the imitation-based optimization algorithm has been used. To conduct this research, first, the types of absorption methods and radar frequencies used were extracted and it was determined that by using external electromagnetic field radiation on composite materials and considering the boundary conditions of radiation waves, a different structure of materials can be observed. In this study, samples of epoxy paint and lanthanum aluminate (LaAlO₃) Nano powder were applied and the absorption percentage of this sample was measured using a network analysis device. For lanthanum aluminate sample, the reflectance loss was -13.8 dB, equivalent to the absorption coefficient of 83%.

Keywords: Radar absorbers Materials (RAM), epoxy paint, algorithm (ISO), Nano coatings, electromagnetic absorption, lanthanum aluminate (LaAlO₃).