



Research Paper;

Numerical modeling of electromagnetic loss mechanisms in Multi Layer Graphene/Epoxy and CNT/Epoxy absorbers based on grooved-surface perturbations and multiple scattering within the porous core

Mohammad Khakbaz¹, Reza Sarkhosh², Masoud Javadi³, Abbas Zarghami⁴

1. Ph.D Student, Department of Aerospace Engineering, Faculty of Graduate Studies, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

Article Information

Abstract

Accepted:
2025/09/06

Received:
2025/12/11

Keywords:

*Electromagnetic absorption;
X - band;
Porous CNT/Epoxy core; Grooved Graphene/Epoxy surface;
Impedance matching*

Corresponding Author:

Email:
abcdef@
ut.ac.ir

Abstract

Electromagnetic absorbers operating within the X-band play a critical role in reducing wave reflection, improving impedance matching, and enhancing the performance of radar systems. In this study, a three-layer structure consisting of a surface Graphene/Epoxy layer, a porous CNT/Epoxy core, and an aluminum backing plate with a total thickness of 7 mm was designed and evaluated using a dual-approach framework: numerical simulation in COMSOL Multiphysics and analytical modeling based on classical electromagnetic theories.


The numerical results indicate that the reflection loss reaches approximately -18.8 dB (corresponding to 98% absorption) around 9 GHz, whereas the analytical model predicts a peak value of -21 dB at the same frequency. Both methods show closely matched trends within the 8–12 GHz band, with deviations becoming more pronounced at the band edges and remaining below 10% near the resonance region. Impedance analysis reveals that minimizing the mismatch between the real part of the effective impedance and the free-space value is the primary factor responsible for the reduced reflection at resonance. Furthermore, the geometric sensitivity analysis shows that increasing the thickness of the surface layer shifts the absorption peak toward approximately 8.5 GHz, while increasing the core thickness moves it toward around 9.5 GHz. These findings demonstrate that precise control over the geometry, thickness, and material parameters of each layer enables effective tuning of the frequency response and optimization of the absorber's performance.



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی (BTitr۱۲)

دوره ۴، شماره ۳
پاییز
صفحات ۸۸-۶۶



مقاله پژوهشی؛ 

مدلسازی عددی تلفات الکترومغناطیسی در جاذب‌های چندلایه Graphene/Epoxy و

CNT/ Epoxy، براساس اختلالات سطح شیاردار و پراکندگی چندگانه هسته متخلخل

محمد خاکباز^۱، رضا سرخوش^۲، مسعود جوادی^۳، عباس زرغامی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

چکیده جاذب‌های الکترومغناطیسی در باند X نقش مهمی در کاهش بازتاب امواج، بهبود امپدانس تطبیق یافته و افزایش کارایی سامانه‌های راداری ایفا می‌کنند. در این پژوهش، یک ساختار سه‌لایه شامل لایه سطحی Graphene/Epoxy، هسته متخلخل CNT/Epoxy و صفحه آلومینیومی پشتی، با ضخامت کل ۷ میلی‌متر، طراحی و به‌صورت هم‌زمان با دو رویکرد حل عددی در نرم‌افزار COMSOL و حل تحلیلی مبتنی مدل‌های کلاسیک الکترومغناطیسی ارزیابی شد. نتایج عددی نشان داد که پارامتر کاهش انعکاس در حوالی ۹ گیگاهرتز به مقدار تقریبی ۱۸.۸- دسی‌بل همراه با ۹۸٪ جذب انرژی می‌رسد، در حالی که مدل تحلیلی همان پیک را با مقدار ۲۱- دسی‌بل پیش‌بینی کرد. هر دو مدل روند نزدیک به همی را در بازه ۸-۱۲ گیگاهرتز نشان دادند؛ با این تفاوت که اختلافها در لبه‌های باند بیشتر و در ناحیه رزونانس کمتر از ۱۰٪ بودند. تحلیل امپدانس نشان داد که نزدیک‌شدن جزء حقیقی امپدانس مؤثر به مقدار آزادفضا، عامل اصلی کاهش بازتاب در فرکانس رزونانس است. علاوه بر این، تحلیل حساسیت هندسی نشان داد که افزایش ضخامت لایه سطحی موجب جابه‌جایی پیک جذب به حدود ۸.۵ گیگاهرتز و افزایش ضخامت هسته موجب انتقال آن به حوالی ۹.۵ گیگاهرتز می‌شود؛ بنابراین کنترل هندسه، ضخامت و خواص لایه‌ها می‌تواند در تنظیم دقیق پاسخ فرکانسی و بهینه‌سازی عملکرد جاذب مؤثر باشد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۹/۲۰

کلیدواژه‌ها:

جذب
الکترومغناطیسی،
باند X، هسته
متخلخل
CNT/Epoxy
سطح شیاردار
Graphene
Epoxy، تطابق
امپدانسی

نویسنده مسئول:

ایمیل:
abcdef@
ut.ac.ir

استناد: خاکباز، محمد؛ سرخوش، رضا؛ جوادی، مسعود؛ زرغامی، عباس. (۱۴۰۴). مدلسازی عددی تلفات الکترومغناطیسی در جاذب‌های چندلایه Graphene/Epoxy و CNT/ Epoxy، براساس اختلالات سطح شیاردار و پراکندگی چندگانه هسته متخلخل. *دفاع هوافضایی*، دوره ۴ (شماره ۳)، صفحه ۸۸-۶۶.

۱ - مقدمه

در عصر گسترش سریع ارتباطات بی‌سیم و افزایش نیاز به مدیریت، هدایت و تضعیف امواج، ماتمتریال‌ها و کامپوزیت‌های پیشرفته به‌عنوان نسل نوینی از جاذب‌ها و شیلدهای الکترومغناطیسی مطرح شده‌اند. این ساختارها با طراحی هم‌زمان ماده و هندسه، مکانیسم‌های اتلاف میدان را تقویت کرده و دستیابی به جذب پهن‌باند، ضخامت کم و پایداری مکانیکی بالا را ممکن می‌سازند. پیشرفت‌هایی نظیر پوشش فرکانسی تا محدوده ۴۰ گیگاهرتز، پاسخ وابسته به زاویه تابش و یکپارچه‌سازی چندفیزیکی، دامنه وسیعی از کاربردها را از استتار راداری تا حسگری RF و سامانه‌های انرژی فراهم کرده‌اند. با این حال، محدودیت در قابلیت تنظیم‌پذیری، پیچیدگی ساخت و پایداری عملکرد در شرایط محیطی سخت هم‌چنان چالش‌های اصلی باقی مانده‌اند [۱-۳]. در این میان، مواد فیبری کربنی (CF) و فیبرهای کاربید سیلیسیم (SiCf) به دلیل چگالی کم، رسانندگی مناسب و وجود مکانیسم‌های مؤثر اتلاف دی‌الکتریک، به‌عنوان گزینه‌هایی سبک‌وزن و کارآمد برای جذب امواج الکترومغناطیسی شناخته می‌شوند. اگرچه این مواد عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهند، بهبود هم‌زمان شدت جذب، پهنای باند مؤثر و پایداری حرارتی هم‌چنان یک چالش بنیادی است. مرورهای اخیر با بررسی مکانیسم‌های تضعیف و روش‌های کنترل ریزساختار، پیشرفت‌های وابسته به CF و SiCf را جمع‌بندی کرده‌اند و فرصت‌های آینده برای توسعه جاذب‌های فیبری با کارایی بالا را ترسیم کرده‌اند [۴]. به‌موازات این روند، نانومواد کربنی نظیر نانولوله‌های کربنی (CNT)، گرافن، نانوالیاف کربنی (CNF)، نانوسفرهای کربنی و کربن‌های متخلخل، به دلیل رسانایی بالا، قطبش بین‌سطحی قوی و سطح ویژه زیاد، نقش اساسی در افزایش تلفات الکترومغناطیسی ایفا می‌کنند و به‌عنوان فازهای رسانای کلیدی در جاذب‌ها به کار گرفته می‌شوند [۵-۹]. در جاذب‌های غیرمغناطیسی، اتلاف دی‌الکتریک، هدایت الکتریکی و قطبش بین‌سطحی مهم‌ترین مکانیسم‌ها هستند و بهینه‌سازی تطبیق امپدانس عامل اصلی کاهش بازتاب محسوب می‌شود. کامپوزیت‌های کربنی متخلخل با ایجاد مسیرهای نفوذ چندگانه و قطبش شدید بین‌سطحی عملکرد چشمگیری نشان داده‌اند؛ به‌عنوان مثال، کامپوزیت SiOC متخلخل با ضخامت ۱.۳۹ میلی‌متر، حداقل تلفات بازتاب ۵۶.۸۵- دسی‌بل و پهنای باند مؤثر بیش از ۴ گیگاهرتز ارائه کرده است. همچنین، هیبریدهای گرافیت/نانوالیاف کربنی با ساختار متخلخل کنترل شده، جذب ۴۴.۱- دسی‌بل و پهنای باند وسیع ۱۲.۵ تا ۱۷.۴ گیگاهرتز را در ضخامت ۱.۵ میلی‌متر حاصل کرده‌اند. نمونه‌های پلیمری تقویت شده با MWCNT نیز به دلیل نسبت طول به قطر بالا و سطح ویژه زیاد، حتی در درصد‌های وزنی پایین، موجب بهبود قابل ملاحظه گذردهی و کاهش بازتاب می‌شوند. این شواهد نشان می‌دهد که کنترل تخلخل، مورفولوژی و ترکیب چندفازی در مواد کربنی نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به ساختارهای سبک، نازک و کارآمد دارد [۱۰]. گرافن و مشتقات آن نیز به دلیل رسانندگی و قابلیت بالای مهندسی ریزساختار، به‌عنوان نسل جدیدی از جاذب‌های EM مطرح شده‌اند. ترکیب گرافن با فازهای دویعدی مانند MXene جذب ۵۸.۳- دسی‌بل در ۱۷.۶ گیگاهرتز و پهنای باند ۴.۹۲ گیگاهرتز با ضخامت ۲.۴ میلی‌متر را ارائه کرده است. هم‌چنین، کامپوزیت‌های متخلخل گرافن/ پلی‌استایرن با طراحی مهندسی شده سلولی، به تلفات

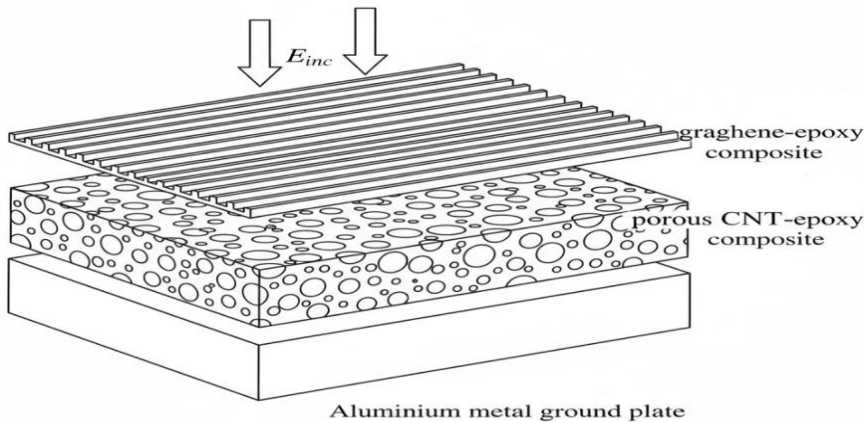
۵۵.۳۷- دسی‌بل و پهنای باند ۵.۸ گیگاهرتز رسیده‌اند که بیانگر اهمیت مورفولوژی مهندسی شده و ساختارهای چندفازی در تحقق جذب پهن‌بند است [۱۱، ۱۲]. همین‌طور بررسی پوشش‌های جاذب مبتنی بر فراموادمانند NbC و Al_2O_3 عملکرد مطلوبی از نظر تطبیق امپدانس و جذب ارائه کرده‌اند [۱۳]. افزون بر این، استفاده از توزیع گرادینانی گرافن در ماتریس پلیمری موجب بهبود تطبیق امپدانس و افزایش شدت جذب شده است؛ به گونه‌ای که در ضخامت ۱۰ میلی‌متر و گرادینان ۰.۷-۰.۹ درصد وزنی، حداقل RL برابر با ۵۴.۴- دسی‌بل و پهنای باند مؤثر ۵.۲ گیگاهرتز گزارش شده است [۱۴]. از سوی دیگر، بررسی هندسه‌های متنوع شامل مقاطع مخروطی، بیضوی و کروی پوشش داده شده با جاذب‌های CNT، مگنتیت-سیلیکا و اپوکسی نشان می‌دهد که شکل سازه نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش RCS دارد؛ به طوری که مقطع سهمی‌گون بیضوی در ۱۰ گیگاهرتز افت ۲.۸- دسی‌بل و مقطع بیضوی در ۹ گیگاهرتز افت ۸- دسی‌بل را حاصل کرده است [۱۵]. هم‌چنین، پژوهش‌هایی بر روی اسپینل فریت‌های نیکل-گرافن نشان داده‌اند که این نانوکامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های الکترومغناطیسی مناسب، گزینه‌های مؤثری برای شیفتهنده‌های فاز راداری در باند ۲- ۱۸ گیگاهرتز هستند [۱۶].

با وجود طیف گسترده‌ای از جاذب‌های چندلایه بررسی شده در ادبیات، بخش عمده‌ای از مطالعات، اثرات هم‌زمان مواد، هندسه را به صورت یکپارچه مدل‌سازی نکرده‌اند. به‌ویژه، ترکیب شیارهای سطحی، تخلخل کنترل شده و مواد کربنی چندفازی در قالب یک متاساختار جامع کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. پژوهش حاضر این خلأ را با طراحی یک ساختار سه‌لایه مهندسی شده شامل لایه Graphene/Epoxy شیاردار، هسته CNT/Epoxy متخلخل و زیرلایه فلزی آلومینیومی برطرف می‌کند. لایه شیاردار با ایجاد امپدانس پله‌ای و تحریک رزونانس‌های هندسی، بازتاب اولیه را کاهش می‌دهد و هسته متخلخل با تقویت قطبش بین‌سطحی، پخش چندگانه و افزایش مسیر مؤثر انتشار، به‌عنوان ناحیه اصلی اتلاف انرژی عمل می‌کند. این پژوهش بهره‌گیری از یک چارچوب دوگانه تحلیلی- عددی است که با ادغام معادلات ماکسول، خط انتقال و تلفات کوبو-گرینوود، برهم‌کنش امواج با ریزساختارهای ناهمگن را با دقت بالاتری توصیف می‌کند. این هم‌پوشانی مدل‌ها نشان می‌دهد که شیارهای سطحی، تخلخل مهندسی شده و رسانندگی فازی مواد کربنی چگونه به صورت هم‌افزا موجب بهبود تطابق امپدانس، افزایش طول مسیر انتشار و تقویت اتلاف دی‌الکتریک می‌شوند.

۲- تعریف مسئله و معادلات

رفتار الکترومغناطیسی جاذب پیشنهادی از برهم‌کنش موج میکروویو فرودی با یک ساختار سه‌لایه ناهمگن و چندمقیاسی شامل لایه کامپوزیتی Graphene/Epoxy با سطح شیاردار دوره‌ای، هسته دی‌الکتریک متخلخل CNT/Epoxy با شبکه‌های رسانای شبه‌پرکولاسیونی، و صفحه فلزی آلومینیومی به‌عنوان بازتابنده پشتی ناشی می‌شود؛ ترکیب هم‌زمان هندسه‌های زیرموجی، تخلخل تصادفی، رسانندگی فرکانس وابسته نانو ساختارها و تداخل موجی چندلایه‌ای سبب می‌گردد که توصیف دقیق پاسخ الکترومغناطیسی تنها از طریق یک چارچوب تحلیلی ترکیبی امکان‌پذیر باشد، به طوری که در این پژوهش، معادلات حاکم بر اساس معادلات کلاسیک پایه ماکسول و خط انتقال موج، مدل

Kubo-Greenwood برای محاسبه رسانندگی پیچیده سطح شیاردار گرافن و نظریه اصلاح شده مخلوط مکسول-گارنت، برای استخراج گذردهی و تراوایی مؤثر هسته متخلخل، برای محاسبه امپدانس ورودی و ضریب بازتاب توسعه یافته‌اند؛ این چارچوب امکان مدل‌سازی هم‌زمان مکانیزم‌های اصلی تضعیف شامل تطابق امپدانس با فضای آزاد، تلفات دی‌الکتریک و رسانشی، پراکندگی چندگانه ناشی از تخلخل، تشدیدهای حفره‌ای و اثرات ساختار شیاردار را فراهم می‌سازد و بدین ترتیب رفتار جذب پهن‌بند جاذب در باند X را به صورت منسجم و فیزیکی قابل تفسیر می‌کند، شماتیک کلی طرح مسئله در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: شماتیک گرافیکی طرح مسئله از جذب الکترومغناطیسی بواسطه سطح هیبریدی شیاردار، متخلخل

معادلات جامع کرل ماکسول برای میدان‌های هارمونیک در محیط جاذب به صورت معادله (۱) و معادله (۲) نوشته می‌شوند:

$$\nabla \times E = -j \omega \mu H \quad (1)$$

$$\nabla \times H = (\sigma + j \omega \varepsilon) E \quad (2)$$

در این روابط E بردار میدان الکتریکی، H بردار میدان مغناطیسی، ω فرکانس زاویه‌ای موج که برابر $2\pi f$ است، μ تراوایی مغناطیسی محیط، ε گذردهی الکتریکی محیط و σ رسانندگی الکتریکی ماده است. این معادلات بیان می‌کنند که تغییرات فضایی میدان الکتریکی و مغناطیسی در محیط به طور مستقیم به خواص الکترومغناطیسی ماده وابسته است.

با اعمال عملگر کرل بر معادله اول و جایگذاری معادله دوم، معادله موج برداری میدان الکتریکی به دست می‌آید:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times E) - \omega^2 \mu \varepsilon E - j \omega \mu \sigma E = 0 \quad (3)$$

در محیط‌های ایزوتروپیک این معادله به معادله هلمهولتز کاهش می‌یابد:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (4)$$

که در آن عدد موج مختلط به صورت معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$k = \omega \sqrt{(\mu \epsilon_c)} \quad (۵)$$

۲-۱ مدل خط انتقال موج^۱ (TLT)

رفتار ولتاژ روی خط انتقال از قوانین ماکسول استخراج می‌شود و اثر مقاومت و اندوکتانس محیط در آن طبق معادله (۶) و تغییرات جریان نیز با اثر رسانندگی و خازنیت محیط در معادله (۷)، مدل می‌شوند [۱۷]:

$$dV/dz = [R' + j\omega L']I(z) \quad (۶)$$

$$dI/dz = [G' + j\omega C']V(z) \quad (۷)$$

که در آن، R' مقاومت واحد طول، L' اندوکتانس واحد طول، ω فرکانس زاویه‌ای، G' رسانندگی واحد طول، C' خازنیت واحد طول، $V(z)$ ولتاژ و $I(z)$ جریان موج در امتداد z می‌باشد. از ترکیب معادلات (۶) و (۷)، ثابت انتشار موج که نشان‌دهنده تضعیف و تغییر فاز است تعیین می‌شود.

$$\gamma = \sqrt{[R' + j\omega L'][G' + j\omega C']} \quad (۸)$$

جایی که γ شامل مؤلفه‌های α و β است که به ترتیب میزان تضعیف و تغییر فاز موج را تعیین می‌کنند. برای محیط‌های دی‌الکتریک تلفاتی، ثابت انتشار را می‌توان با پارامترهای الکترومغناطیسی بازنویسی کرد:

$$\gamma = \sqrt{[j\omega\mu_0\mu_r][\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r]} \quad (۹)$$

که μ_r تراوایی نسبی، ϵ_r گذردهی نسبی و σ رسانندگی محیط است. ثابت انتشار همیشه شامل دو بخش حقیقی و موهومی است که مولفه‌های تضعیف و ثابت فاز موثر از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (۱۰)$$

$$\alpha = \sigma \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{2\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r}}} \quad (۱۱)$$

$$\beta = \omega \sqrt{(\mu_0\mu_r\epsilon_0\epsilon_r)} \quad (۱۲)$$

امپدانس مشخصه خط انتقال به شکل معادله (۱۳) تعریف می‌شود. که Z_0 امپدانس طبیعی محیط و کلید اصلی تطبیق امپدانس جاذب است:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{[R' + j\omega L']}{[G' + j\omega C']}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}} \quad (۱۳)$$

میدان الکتریکی و مغناطیسی موج تخت در امتداد z با شکل نمایی معادله (۱۴) و (۱۵) نمایش داده

^۱ Transmission Line Theory

می‌شود:

$$E_i(z, t) = E_{0i} e^{j(\bar{k}_i z - \omega t)} \quad (14)$$

$$H_i(z, t) = H_{0i} e^{j(\bar{k}_i z - \omega t)} \quad (15)$$

که در آن k عدد موج (از معادله ۵)، E_0 دامنه میدان الکتریکی و H_0 دامنه میدان مغناطیسی است. امپدانس ورودی یک لایه با ضخامت d از روابط زیر به دست می‌آید. که برای معادله (۱۷) برای مواد کم تلفات و شرایط مرزی معادله (۱۸) برای ساختار پشت فلزی با امپدانس نهایی صفر بیان می‌شود.

$$Z_{in} = Z_0 \tanh(\gamma d) \quad (16)$$

$$Z_{in} \approx jZ_0 \times \tan(\beta d) \quad (17)$$

$$Z_L = 0 \quad (18)$$

امپدانس ورودی لایه دوم در ساختار چندلایه از رابطه بازگشتی زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{in,2} = z_2 \frac{jz_2 \tan(\beta_2 d_2) + z_L}{z_2 + jz_L \tan(\beta_2 d_2)} \quad (19)$$

که در آن z_2 امپدانس لایه دوم و d_2 ضخامت آن است. سپس امپدانس ورودی لایه اول محاسبه می‌شود.

$$Z_{in,1} = z_1 \frac{jz_1 \tan(\beta_1 d_1) + Z_{in,2}}{z_1 + jZ_{in,2} \tan(\beta_1 d_1)} \quad (20)$$

که در آن z_1 امپدانس لایه دوم و d_1 ضخامت آن است. این مقدار امپدانس است که موج در سطح ورودی تجربه می‌کند.

ضریب بازتاب کل ساختار از امپدانس ورودی طبق رابطه (۲۱) تعیین می‌شود [۱۸ و ۱۹].

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (21)$$

که Γ مقدار بازتاب موج از سطح جاذب است.

در نهایت تلفات بازتابی بر حسب دسی بل و جذب کل از روابط (۲۲) و (۲۳) استخراج می‌شود

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (dB) \quad (22)$$

$$A = 1 - |\Gamma|^2 \quad (23)$$

۲-۲ مدل کوبو-گرینوود^۱ (KB) برای لایه گرافنی

برای محاسبه رسانندگی سطحی گرافن، ابتدا بخش درون‌نواری رسانندگی بر اساس پراکندگی الکترون‌ها مدل می‌شود [۲۰ و ۲۱]:

$$\sigma_{intra}(\omega) = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar^2} \frac{\mu_c}{\omega^2 + (\tau^{-1})^2} \quad (24)$$

که در آن e بار الکترون، k_B ثابت بولتزمن، T دما، μ_c انرژی فرمی، τ زمان آرامش و \hbar ثابت پلانک کاهیده است.

^۱ Kubo-Greenwood model

بخش بین‌نواری گرافن اثر انتقال الکترون‌ها میان باندهای انرژی را مدل می‌کند:

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{(\hbar\omega - 2\mu_c)}{2k_B T} \right] \quad (25)$$

این بخش در فرکانس‌های بالا غالب است و از رفتار کوانتومی حامل‌ها ناشی می‌شود. در نهایت رسانندگی کل گرافن از مجموع دو مولفه روابط (۲۴) و (۲۵) بدست می‌آید که با σ_g نشان داده می‌شود. همینطور امپدانس سطحی معادل گرافن از رابطه معکوس رسانندگی تعیین می‌شود:

$$Z_g = \frac{1}{\sigma_g} \quad (26)$$

پاسخ الکترومغناطیسی شیارهای سطح گرافن را می‌توان با امپدانس سطحی بدست آمده از معادله (۲۶) مدل کرد:

$$Z_g = j\omega\mu_0 \left(\frac{h}{w} \right) \tan(kh) \quad (27)$$

همین طور برای شیارهای پر شده با ماده اتلافی رابطه (۲۸) استفاده می‌شود:

$$Z_g = j\omega\mu_0 \left(\frac{h}{w} \right) \tan(\gamma h) \quad (28)$$

در این روابط Z_g امپدانس سطحی، h عمق شیار، w عرض شیار، μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ، k عدد موج و γ ثابت انتشار موج در ماده داخل شیار است.

۲-۳ مدل اصلاح شده ماکسول-گارنت برای هسته متخلخل CNT/Epoxy

برای محاسبه گذردهی مؤثر و تراوایی مغناطیسی مؤثر CNT-core، ابتدا رابطه مخلوط‌سازی ماکسول-گارنت^۱ اعمال می‌شود:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_h \left(1 + \frac{3f(\epsilon_i - \epsilon_h)}{\epsilon_i + 2\epsilon_h - f(\epsilon_i - \epsilon_h)} \right) \quad (29)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_h \left(1 + \frac{3f(\mu_i - \mu_h)}{\mu_i + 2\mu_h - f(\mu_i - \mu_h)} \right) \quad (30)$$

در این روابط ϵ_h گذردهی ماتریس اپوکسی، ϵ_i گذردهی CNT، μ_i تراوایی مغناطیسی CNT، μ_h تراوایی مغناطیسی ماتریس و f کسر حجمی گرافن در کامپوزیت است. در مدل‌سازی دقیق، گذردهی مؤثر محیط متخلخل مطابق با مدل اصلاح‌شده، روابط با ترم‌های تخلخل نوشته می‌شود:

$$\epsilon_{\text{Porous}} = (1 - P)\epsilon_{MG} + P\epsilon_{\text{air}} \quad (31)$$

و همین طور تلفات پراکندگی ناشی از حفره‌ها در هسته CNT با افزودن جمله تلفات وابسته به کنتراست امپدانس مدل می‌شود:

¹ Maxwell-Gsnet Method

$$\varepsilon_{eff} = \alpha P(1-P) \left| \frac{\varepsilon_{MG} - \varepsilon_{air}}{\varepsilon_{MG} + \varepsilon_{air}} \right|^2 \quad (32)$$

که در آن α ضریب هندسی وابسته به شکل حفره‌ها است. نهایتاً گذردهی مؤثر هسته متخلخل با جمع تلفات دی‌الکتریک و تلفات پراکندگی تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{porous}' - j(\varepsilon_{porous}'' + \varepsilon_{scatt}'') \quad (33)$$

در حالت کلی، تضعیف شدید امواج میکروویو در این ساختار نتیجه هم‌افزایی چندین مکانیزم فیزیکی است که شامل تطبیق امپدانس بین هوا و لایه‌های جاذب، اتلاف دی‌الکتریک ناشی از قطبش بین‌سطحی در کامپوزیت‌های گرافن و CNT، اتلاف رانشی در شبکه‌های پرکولاسیونی، بازتاب‌های چندگانه در حفرات و شیارها، افزایش طول مسیر انتشار میدان در ساختار متخلخل و تشدید حفره‌ای در لایه‌های دی‌الکتریک می‌باشد. ترکیب این مکانیزم‌ها موجب افزایش اتلاف انرژی الکترومغناطیسی و در نتیجه کاهش قابل توجه ضریب بازتاب در باند فرکانسی X می‌شود.

۳-مدلسازی عددی

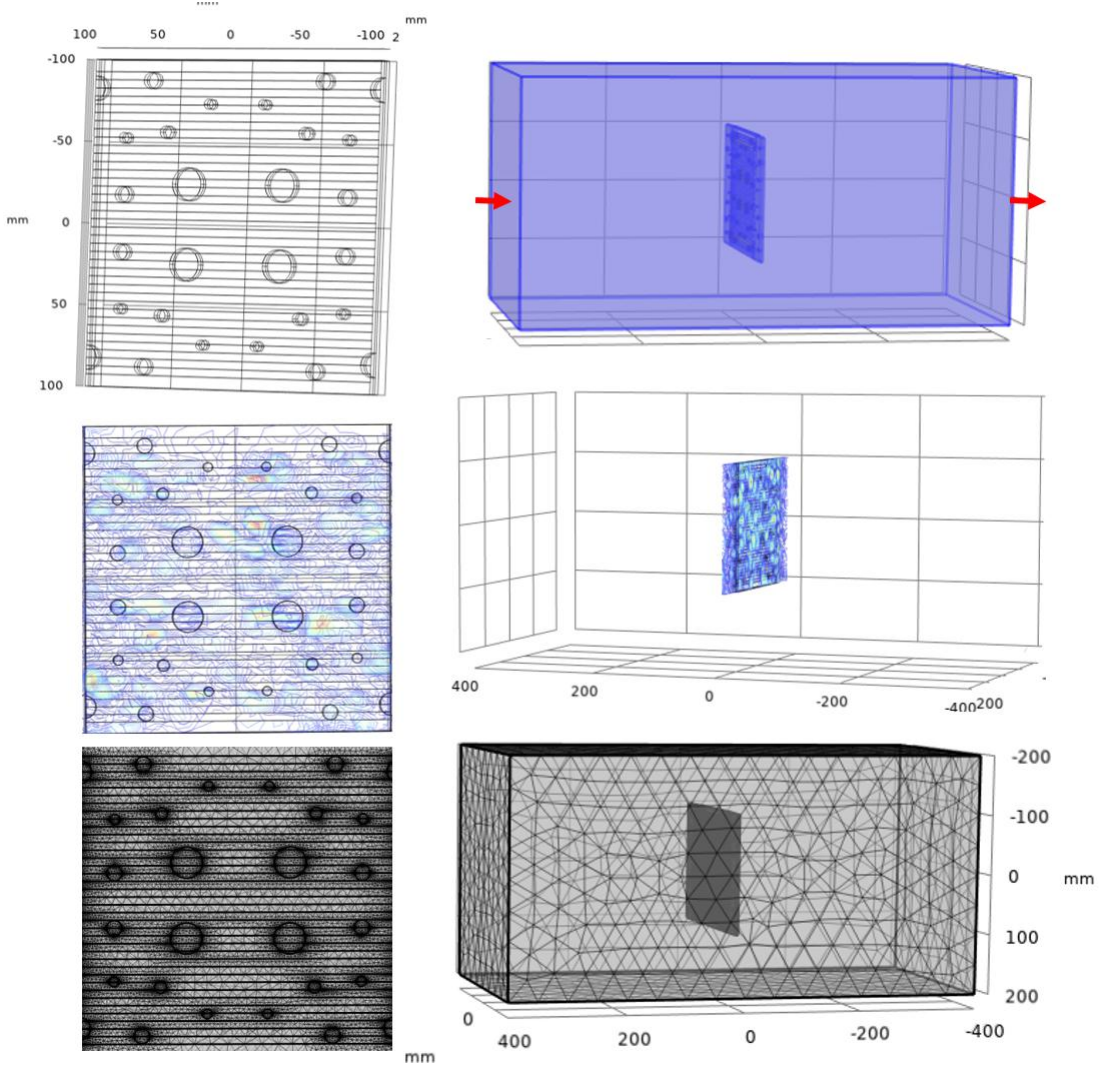
در تحلیل عددی با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، مدلسازی در ماژول RF (Electromagnetic Waves, Frequency Domain) انجام شد. ابتدا در بخش Geometry، یک دامنه سه بعدی به صورت واحد سلول (Unit Cell) تعریف گردید. لایه پایه به عنوان یک بلوک صلب با خواص آلومینیوم و ضخامت ۵ میلی‌متر و لایه میانی شامل کامپوزیت CNT/Epoxy با ضخامت ۱ میلی‌متر ترسیم شد. برای اعمال تخلخل در لایه میانی، از آرایه‌ای از اشکال هندسی کرووی یا استوانه‌ای با توزیع تصادفی استفاده شد که با استفاده از عملگر Boolean Difference از بلوک اصلی کسر شدند تا فضاها خالی (Air Voids) ایجاد گردد. لایه سطحی Graphene/Epoxy نیز با استفاده از ابزار Work Plane و ترسیم پروفیل‌های مستطیلی، به صورت شیاردار (Grooved) با ضخامت ۱ میلی‌متر مدل‌سازی شد که در آن فواصل و عمق شیارها برای بهینه‌سازی تطبیق امپدانس تنظیم گردید. در مرحله تعیین مواد (Materials)، برای هر لایه پارامترهای اختصاصی شامل گذردهی الکتریکی (ε_r)، تراوایی مغناطیسی (μ_r) و رسانندگی الکتریکی (σ) به صورت توابع وابسته به فرکانس تعریف شدند. برای لایه‌های ناهمگن، خواص مؤثر بر اساس مدل‌های استخراج شده در بخش تحلیلی به گره‌های ماده اختصاص یافت. در تنظیمات فیزیکی، یک Port در دیواره فضای هوا (مانند سیستم موج‌بر) برای تابش موج تخت (Plane Wave) با قطبش مشخص تعریف شد. با توجه به وجود لایه آلومینیوم در انتها، از شرط مرزی Perfect Electric Conductor (PEC) در سطح زیرین استفاده شد که باعث بازتاب کامل و حذف انتقال موج می‌گردد. دیواره‌های جانبی نیز با شرط مرزی Periodic Boundary Condition (PBC) یا Floquet Periodic Condition تنظیم شدند تا رفتار ساختار در یک آرایه نامحدود شبیه‌سازی شود. بخش حیاتی شبیه‌سازی، مطالعه همگرایی مش (Mesh Convergence) بود. شبکه‌بندی به صورت Free Tetrahedral انجام شد و در نواحی بحرانی مانند لبه شیارها و مرز تخلخل‌ها از تکنیک Mesh Control برای ریزتر کردن شبکه استفاده گردید. اندازه بیشینه المان‌ها

بر اساس معیار گذردهی و نفوذپذیری تعیین شد تا میدان‌های نوسانی به درستی نمونه‌برداری شوند. همگرایی با مانیتور کردن تغییرات پارامتر RL در فرکانس مرکزی باند X (یعنی ۱۰ گیگاهرتز) بررسی شد؛ به طوری که با افزایش تعداد المان‌ها از ۱۰۰ هزار به ۵۰۰ هزار، تغییرات در نتایج به کمتر از ۰.۵ درصد رسید که نشان‌دهنده استقلال نتایج از شبکه است. در نهایت، با اجرای Frequency Step در بازه ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز، نتایج برای محاسبه تلفات بازگشتی، ماتریس پراکنندگی، مقادیر جذب، ادمیتانس و... استخراج گردید.

جدول ۱: پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختار سه‌لایه

Category	Parameter	Symbol	Value	unit	Notes
Geometry	Sample Lenth	L	20	mm	-
	Sample Width	M	20	mm	-
	Graphene/ Epoxy Thickness	t_1	1.00	mm	Top Patterned Layer
	CNT/ Epoxy Thickness	t_2	1.00	mm	Porous Core
	Aluminum Thickness	t_3	5.00	mm	Perfect Reflector
Grooved Layer	Number of Grooves	N	40	-	Uniform Spacing
	Groove width	w	0.20	mm	-
	Groove depth	h	0.30	mm	-
	Groove Period	p	0.50	mm	20mm/40 Grooves
	Minimum pore radius	r_{min}	0.05	mm	Random non-overlapping distribution

Porous Core Layer	Maximum pore Radius	r_{max}	0.15	mm	Random non-overlapping distribution
	Porosity	ϕ	0.20	-(20%)	Target Porosity



شکل ۲: خلاصه‌ای از روند شبیه‌سازی ساختار جاذب در نرم افزار المان محدود کامسول

۴- نتایج و بحث

۴-۱ نتایج عددی

جدول ۲ و نمودارهای شکل ۳ رفتار الکترومغناطیسی جاذب سه لایه پیشنهادی شامل لایه سطحی

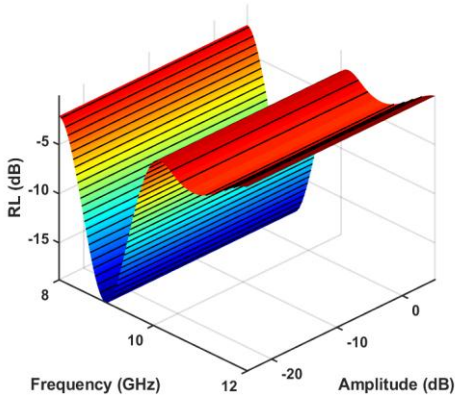
شیاردار Graphene/Epoxy، هسته متخلخل CNT/Epoxy و زیرلایه فلزی آلومینیومی را در بازه فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز به صورت دقیق نشان می‌دهد. در فرکانس ۸ گیگاهرتز، مقدار RL برابر با ۲۰۱۰- دسی‌بل و مقدار بازتاب حدود ۰.۶۲ است که نشان‌دهنده عدم تطبیق امپدانس میان ساختار و فضای آزاد است. این موضوع با بررسی امپدانس ورودی Z_{in} روشن‌تر می‌شود، زیرا مقدار حقیقی امپدانس فاصله قابل توجهی از مقدار ۳۷۷ اهم دارد و بخش موهومی نیز بزرگ است. در چنین شرایطی بخش زیادی از انرژی موج در سطح مشترک هوا و لایه جاذب بازتاب می‌شود و تنها مقدار محدودی از میدان الکتریکی $|E|$ وارد ساختار می‌گردد. همین نفوذ محدود موجب می‌شود جذب تنها به ۳۸.۳ درصد برسد که مشخصه رفتار ضعیف جاذب در ابتدای باند فرکانسی است. با افزایش فرکانس به ۸.۵ گیگاهرتز، تغییرات در ریزساختار واکنشی و نحوه برانگیختگی جریان‌های سطحی در شیادهای Graphene-Epoxy باعث کاهش RL تا ۱۰.۴۵- دسی‌بل می‌شود و بازتاب به شدت کاهش می‌یابد. در این نقطه، مقدار ادمیتانس ورودی Y_{in} نیز به تعادل نزدیک‌تری می‌رسد و شرایط حداقلی برای جریان برگشتی فراهم می‌گردد. نتیجه این فرایند، افزایش نفوذ میدان و افزایش شدت میدان الکتریکی $|E|$ در درون لایه CNT/Epoxy است که موجب بالا رفتن میزان جذب تا ۹۰.۹ درصد می‌شود. رفتار ساختار در فرکانس ۹ گیگاهرتز، که نقطه رزونانس اصلی جاذب است، بسیار برجسته‌تر است. در این فرکانس، مقدار RL به ۱۸.۸۰- دسی‌بل کاهش می‌یابد و علت این رویداد آن است که مقدار حقیقی امپدانس ورودی Z_{in} تقریباً برابر با ۳۷۷ اهم شده و بخش موهومی نیز به کمینه مقدار خود رسیده است. تحت این شرایط، موج الکترومغناطیسی تقریباً بدون بازتاب وارد ساختار می‌شود و در نتیجه شدت میدان الکتریکی $|E|$ درون لایه‌های جاذب به حداکثر مقدار خود می‌رسد. بر این اساس، مقدار جذب به ۹۸.۶ درصد می‌رسد که بیشینه جذب در کل بازه فرکانسی بررسی شده است. هم‌زمانی نفوذ بهینه میدان، فعال شدن تلفات رسانشی در شبکه CNT، تلفات دی‌الکتریک در رزین اپوکسی و قطبش‌های بین‌سطحی در فصل مشترک لایه‌ها، همگی موجب افزایش اتلاف انرژی و تشکیل یک قله جذبی پایدار و تیز می‌شوند. در فرکانس ۹.۵ گیگاهرتز، اگرچه مقدار امپدانس ورودی از شرایط ایده‌آل کمی فاصله می‌گیرد، اما ساختار هم‌چنان جذب بالا حدود ۹۱ درصد را حفظ می‌کند. این پایداری جذب نشان‌دهنده آن است که طراحی سه‌لایه در نزدیکی باند رزونانس از حساسیت بالایی نسبت به تغییرات فرکانس برخوردار نیست و رفتار آن نسبتاً پهن‌بند است. این ویژگی معمولاً ناشی از پراکندگی میدان در منافذ لایه CNT/Epoxy و وجود مسیرهای جذب چندگانه در ساختارهای متخلخل است. در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز، امپدانس ورودی Z_{in} و ادمیتانس Y_{in} هر دو از مقدار بهینه فاصله می‌گیرند و اختلاف فاز میان میدان‌های برگشتی و پیش‌رونده افزایش می‌یابد. همین تغییرات سبب می‌شود مقدار بازتاب افزایش یابد و مقدار جذب به ۳۹.۷ درصد کاهش پیدا کند. در این فرکانس، شدت میدان الکتریکی $|E|$ نیز نسبت به مقدار اوج خود کاهش قابل توجهی را تجربه می‌کند. در فرکانس‌های ۱۰.۵ و ۱۱ گیگاهرتز، رفتار خاصی مشاهده می‌شود. اگرچه S_{21} همچنان به شدت منفی باقی می‌ماند و عملاً عبور موج وجود ندارد، اما چون مقدار RL افزایش یافته و امپدانس ورودی از مقدار تطبیق‌یافته دور می‌شود، بخشی از موج قبل از نفوذ به لایه‌های درونی بازتاب

می‌شود. در این حالت جذب به ترتیب ۴۶.۱ و ۵۱.۹ درصد است. وجود زیرلایه فلزی آلومینیومی موجب می‌شود که همه انرژی نفوذی نهایتاً در ساختار به دام بیفتد، اما چون مقدار میدان نفوذی اولیه کاهش یافته است، جذب به مقادیر متوسط محدود می‌شود. در فرکانس ۱۱.۵ گیگاهرتز، مقدار RL به ۱.۵۸- دسی‌بل نزدیک می‌شود و بازتاب تقریباً کامل می‌گردد. امپدانس ورودی Z_{in} در این محدوده فرکانسی ناپایدار بوده و بخش موهومی نیز افزایش یافته است. از سوی دیگر، شدت میدان الکتریکی $|E|$ در لایه‌های جذب کاهش می‌یابد که بیانگر عدم نفوذ صحیح موج در ساختار است. در نتیجه، مقدار جذب به ۳۰.۵ درصد می‌رسد. سرانجام، در فرکانس ۱۲ گیگاهرتز، مقدار RL تقریباً برابر صفر دسی‌بل می‌شود و ساختار مانند یک سطح بازتابنده کامل تنها با ۴.۵ درصد جذب عمل می‌کند. در این فرکانس، امپدانس ورودی به‌طور محسوسی از مقدار امپدانس فضای آزاد فاصله گرفته و مقدار ادmittانس نیز از شرایط بهینه خارج می‌شود. در این حالت شدت میدان $|E|$ درون ساختار به کمترین مقدار خود می‌رسد. چنین رفتاری نشان‌دهنده خروج کامل ساختار از ناحیه عملکرد جذبی و غلبه رفتار فلزی زیرلایه آلومینیومی است.

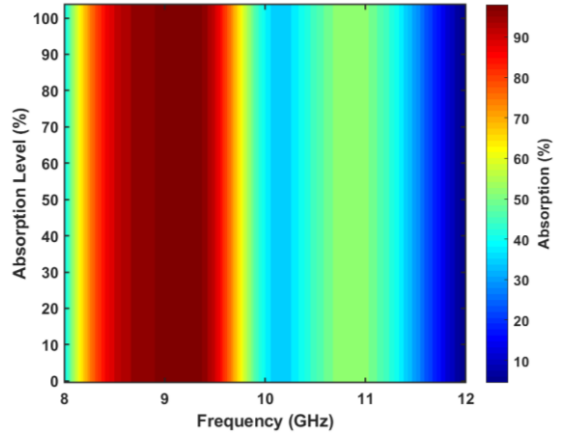
به‌طور کلی، تحلیل هم‌زمان تمام پارامترهای جدول نشان می‌دهد که نقطه رزونانس در ۹ گیگاهرتز نتیجه مستقیم هماهنگی دقیق میان امپدانس ورودی، میزان نفوذ میدان، شدت میدان الکتریکی و مکانیزم‌های اتلافی است و رفتار گذرای ساختار در فرکانس‌های بالاتر و پایین‌تر نیز از منطق کلاسیک تطبیق امپدانس و انتشار موج در محیط‌های متخلخل تبعیت می‌کند. این موضوع کارآمدی طراحی سه‌لایه و پایداری عملکرد آن در ناحیه رزونانس را به‌خوبی تأیید می‌نماید.

جدول ۲: نتایج پارامترهای موثر الکترومغناطیسی ناشی از حل عددی المان محدود

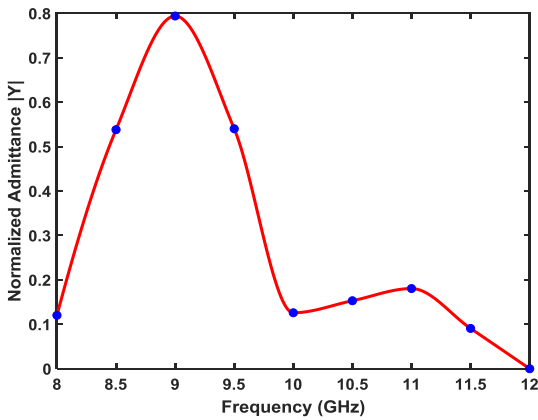
Freq (GHz)	RL (dB)	Reflection	Abs %	Z_{in} Ω	Y_{in} (s)	$ E $ Surface (norm)	$ E $ Core (norm)	Bandwidth (RL < -10 dB)
8	-2.10	0.62	38.34	472+82j	0.0020	0.63	0.48	Out-of-band
8.5	-10.45	0.090	90.98	410+39j	0.0024	0.78	0.5	Start
9	-18.80	0.013	98.68	376+08j	0.00265	1.00	0.55	In Band
9.5	-10.50	0.088	91.09	392+12j	0.00255	0.86	0.50	End
10	-2.20	0.60	39.74	437+17j	0.00229	0.71	0.46	Out-of-band
10.5	-2.68	0.54	46.10	448+21j	0.00223	0.64	0.42	Out-of-band
11	-3.17	0.48	51.90	455+25j	0.00300	0.50	0.40	Out-of-band
11.5	-1.58	0.69	30.50	462+30j	0.00305	0.45	0.347	Out-of-band
12	-0.02	1.00	4.50	475+33j	0.00308	0.41	0.34	Out-of-band



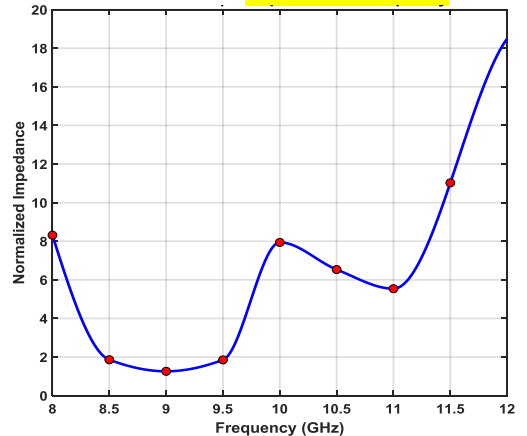
(a)



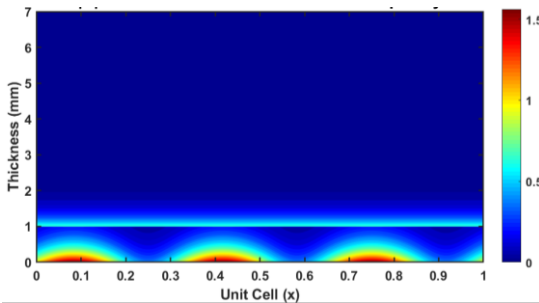
(b)



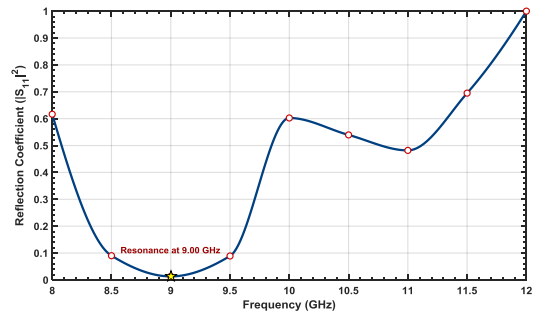
(c)



(d)



(e)



(f)

شکل ۳: نتایج حل عددی ساختار سه‌لایه جاذب: (a) توزیع سه‌بعدی تلفات بازتاب (Reflection Loss) برحسب فرکانس و دامنه ورودی، (b) نقشه حرارتی میزان جذب امواج الکترومغناطیسی در بازه ۸–۱۲ گیگاهرتز، (c) تغییرات ادمیتانس نرمال‌شده جاذب نسبت به فرکانس، (d) تغییرات امپدانس ورودی نرمال‌شده ساختار نسبت به فرکانس، (e) توزیع مکانی پراکندگی میدان الکتریکی در راستای ضخامت لایه و موقعیت سلول واحد، (f) ضرایب بازتاب محاسبه‌شده و تعیین فرکانس رزونانس اصلی جاذب

۴-۲ تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی پایداری عملکرد جاذب الکترومغناطیسی سه لایه و هم چنین بررسی میزان وابستگی عملکرد ساختار به پارامترهای هندسی، تحلیل حساسیت عددی نسبت به تغییر ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده انجام شد. در ساختارهای جاذب چندلایه، توزیع ضخامت میان لایه‌های مختلف یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی محسوب می‌شود، زیرا ضخامت هر لایه به طور مستقیم بر امپدانس مؤثر، شرایط انتشار موج، مکان رزونانس و در نهایت میزان افت انعکاس تأثیر می‌گذارد. در واقع، تغییر ضخامت لایه‌ها موجب تغییر در مسیر انتشار موج الکترومغناطیسی، تغییر در میزان تداخل سازنده و مخرب امواج بازتابی و همچنین تغییر در شرایط تطابق امپدانس میان ساختار و فضای آزاد می‌شود. به همین دلیل، مطالعه حساسیت ضخامت لایه‌ها به عنوان یکی از مراحل مهم در طراحی جاذب‌های باند وسیع در نظر گرفته می‌شود.

در این مطالعه سه پیکربندی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در حالت نخست، ساختار مرجع شامل دو لایه با ضخامت مساوی (۱ میلی‌متر برای لایه سطحی Graphene/Epoxy و ۱ میلی‌متر برای هسته متخلخل CNT/Epoxy) در نظر گرفته شد. در حالت دوم، ضخامت لایه سطحی افزایش یافته و به ۱.۵ میلی‌متر رسید در حالی که ضخامت هسته به ۰.۵ میلی‌متر کاهش یافت. در حالت سوم، شرایط معکوس در نظر گرفته شد؛ به طوری که ضخامت لایه سطحی به ۰.۵ میلی‌متر کاهش یافته و ضخامت هسته به ۱.۵ میلی‌متر افزایش یافت. هدف از این تغییرات، بررسی اثر توزیع ضخامت بر رفتار جذب در بازه فرکانسی باند X یعنی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز است.

نتایج نشان می‌دهد که در ساختار مرجع، بیشترین میزان افت انعکاس در حدود فرکانس ۹ گیگاهرتز رخ می‌دهد و مقدار RL به حدود ۱۸.۸- دسی‌بل می‌رسد. این مقدار نشان‌دهنده جذب بیش از ۹۸ درصد انرژی موج تابشی است. چنین عملکردی نشان می‌دهد که در این فرکانس، امپدانس ورودی ساختار تقریباً با امپدانس مشخصه فضای آزاد تطابق پیدا کرده است. هنگامی که ضخامت لایه سطحی افزایش می‌یابد، پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر منتقل می‌شود و بیشینه افت انعکاس در حدود ۸.۵ گیگاهرتز با مقدار تقریبی ۱۸.۱- دسی‌بل مشاهده می‌شود. این رفتار ناشی از افزایش طول مسیر انتشار موج در لایه سطحی و افزایش ثابت فاز موج در محیط مؤثر است که در نتیجه باعث کاهش فرکانس رزونانس می‌شود.

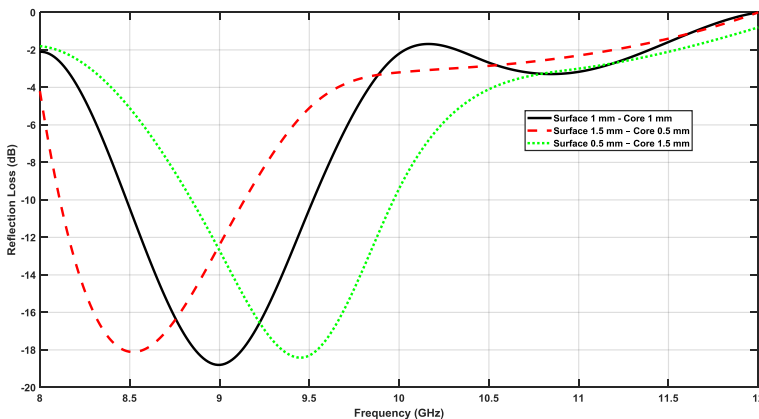
در مقابل، زمانی که ضخامت هسته متخلخل افزایش می‌یابد، پیک جذب به سمت فرکانس‌های بالاتر منتقل شده و بیشینه افت انعکاس در حدود ۹.۵ گیگاهرتز با مقدار تقریبی ۱۸.۳- دسی‌بل مشاهده می‌شود. افزایش ضخامت هسته باعث افزایش سهم تلفات دی‌الکتریک و همچنین تغییر در ثابت دی‌الکتریک مؤثر ساختار می‌شود. از دیدگاه فیزیکی، محیط متخلخل CNT/Epoxy دارای مکانیزم‌های مختلف اتلاف انرژی شامل پلاریزاسیون بین سطحی، تلفات هدایتی و پراکندگی چندگانه در ساختار متخلخل است. افزایش ضخامت این لایه موجب می‌شود موج الکترومغناطیسی زمان بیشتری را در محیط اتلافی سپری کند و در نتیجه شرایط رزونانس به فرکانس‌های بالاتر منتقل شود.

برای تحلیل دقیق‌تر شرایط تطابق امپدانس، مسیر تغییرات ضریب بازتاب در نمودار اسمیت بررسی شد. نمودار اسمیت ابزاری بسیار مهم در تحلیل سیستم‌های میکروویوی است که امکان نمایش رفتار امپدانس نرمالیزه شده را به صورت هم‌زمان در حوزه حقیقی و موهومی فراهم می‌کند. در این نمودار، مرکز دایره بیانگر شرایط تطابق کامل امپدانس است که در آن ضریب بازتاب برابر صفر بوده و تمام انرژی موج به داخل ساختار منتقل می‌شود. هرچه نقاط مربوط به فرکانس‌های مختلف به مرکز نمودار نزدیک‌تر باشند، میزان بازتاب کاهش یافته و عملکرد جذب بهبود می‌یابد.

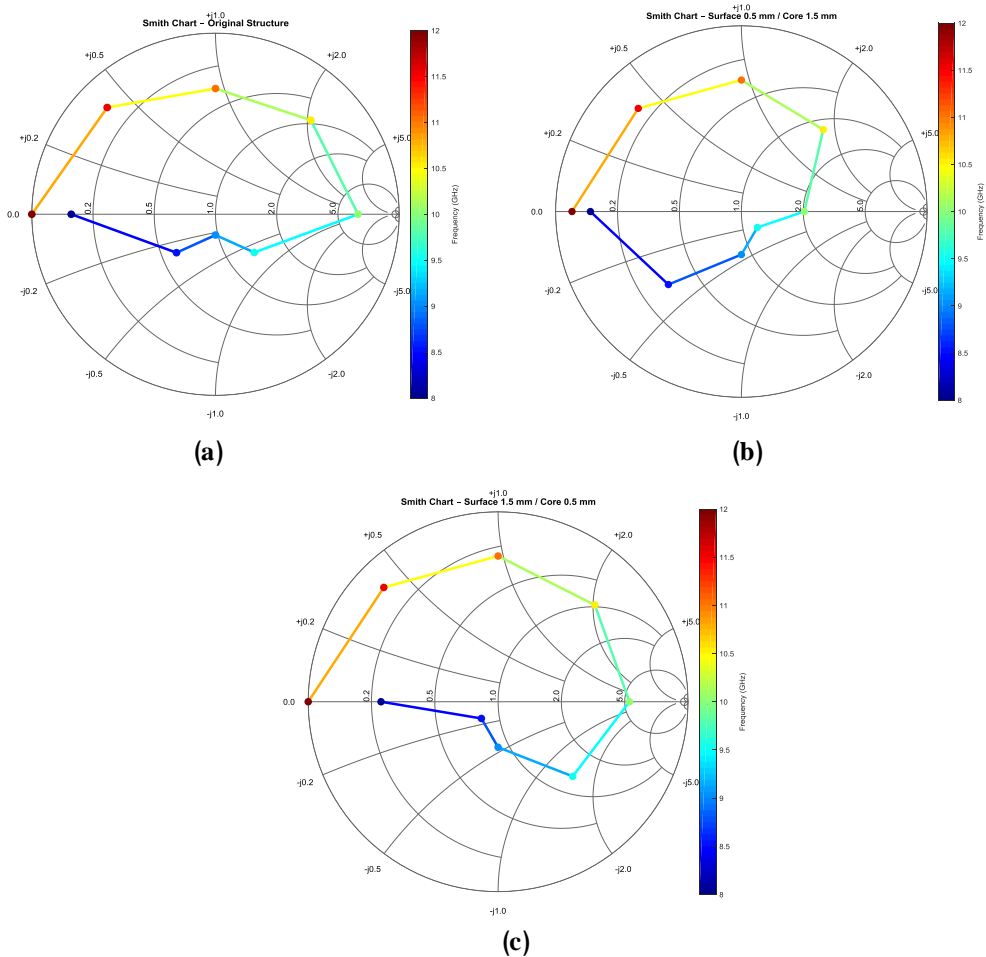
در ساختار مرجع مشاهده می‌شود که مسیر تغییرات ضریب بازتاب با افزایش فرکانس به تدریج به مرکز نمودار اسمیت نزدیک می‌شود و در حوالی ۹ گیگاهرتز کمترین فاصله از مرکز را دارد. این رفتار کاملاً با مقدار بیشینه افت انعکاس در همان فرکانس سازگار است. در فرکانس‌های پایین‌تر مانند ۸ گیگاهرتز، نقطه متناظر در نمودار اسمیت در ناحیه‌ای با مؤلفه موهومی منفی قرار دارد که نشان‌دهنده غالب بودن رفتار خازنی در ساختار است. با افزایش فرکانس، مسیر نمودار از این ناحیه عبور کرده و به سمت نواحی با مؤلفه موهومی مثبت حرکت می‌کند که بیانگر رفتار القایی ساختار است.

در حالتی که ضخامت لایه سطحی افزایش یافته است، مسیر نمودار اسمیت زودتر به ناحیه مرکزی نزدیک می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که شرایط تطابق امپدانس در فرکانس‌های پایین‌تر برقرار می‌شود که دقیقاً با انتقال پیک جذب به حدود ۸.۵ گیگاهرتز مطابقت دارد. در مقابل، در حالتی که ضخامت هسته افزایش یافته است، مسیر نمودار اسمیت در فرکانس‌های پایین‌تر فاصله بیشتری از مرکز دارد و تنها در فرکانس‌های بالاتر به مرکز نزدیک می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده انتقال شرایط تطابق امپدانس به حوالی ۹.۵ گیگاهرتز است.

به طور کلی، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که تغییر ضخامت لایه‌ها نه تنها موقعیت فرکانسی پیک جذب را تغییر می‌دهد بلکه بر کیفیت تطابق امپدانس نیز تأثیر قابل توجهی دارد. توزیع مناسب ضخامت میان لایه سطحی رسانا و هسته ااتلافی می‌تواند موجب ایجاد شرایط بهینه برای تداخل مخرب امواج بازتابی و افزایش جذب انرژی شود. نمودارهای واقع در اشکال ۴ و ۵ به ترتیب نشان دهنده کاهش انعکاس الکترومغناطیسی و تطابق امپدانس در نمودار قطبی اسمیت می‌باشند.



شکل ۴: نتایج کاهش انعکاس در باند ایکس برای ساختار سه لایه با ضخامت‌های مختلف

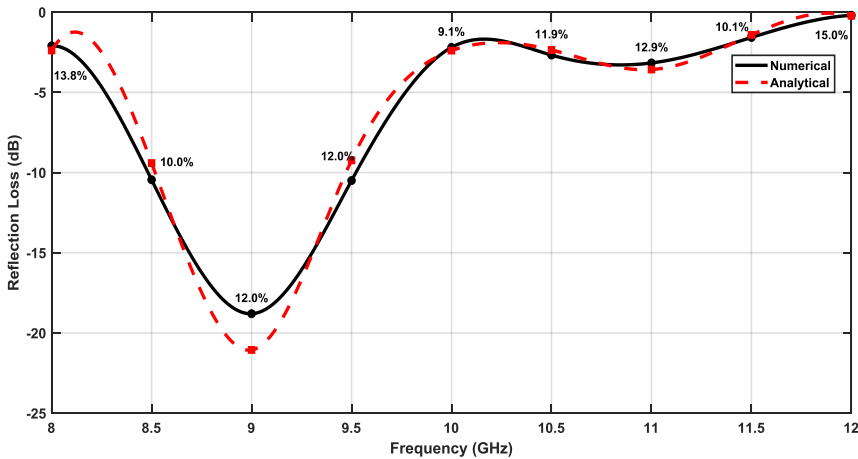


شکل ۵: نمودارهای اسمیت ساختار جاذب برای بررسی تطبیق امپدانس در مدل‌های مختلف ضخامت لایه‌ها: (a) نمودار اسمیت مربوط به ساختار اولیه (بدون تغییر ضخامت لایه سطحی و هسته)، (b) نمودار اسمیت برای حالت تغییر ضخامت لایه سطحی به +۰.۵ میلی‌متر و ضخامت هسته به ۱.۵ میلی‌متر، (c) نمودار اسمیت برای حالت تغییر ضخامت لایه سطحی به ۱.۵ میلی‌متر و ضخامت هسته به +۰.۵ میلی‌متر

۴-۳ صحت‌سنجی

مقایسه نتایج عددی و تحلیلی کاهش بازتاب RL در بازه فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز نشان می‌دهد که هر دو روش روند فرکانسی بسیار مشابهی را دنبال می‌کنند و این موضوع بیانگر اعتبار مدل تحلیلی ارائه شده برای توصیف رفتار الکترومغناطیسی جاذب است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس از ۸ گیگاهرتز مقدار RL به تدریج کاهش یافته و در حوالی ۹ گیگاهرتز به کمینه خود در حدود ۱۸- تا ۲۱- دسی‌بل می‌رسد که نشان‌دهنده وقوع رزونانس و تطبیق مناسب امپدانس ورودی با امپدانس فضای آزاد است. این پدیده سبب کاهش شدید بازتاب و افزایش تلفات

جذب در ساختار چندلایه می‌شود. در این ناحیه رزونانسی اختلاف بین حل عددی و تحلیلی حدود ۱۲ درصد مشاهده می‌شود که این اختلاف می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌های ذاتی به‌کاررفته در مدل تحلیلی باشد؛ به‌گونه‌ای که در این نوع مدل‌ها معمولاً ساختارهای کامپوزیتی ناهمگن به‌صورت یک محیط مؤثر همگن با پارامترهای الکترومغناطیسی معادل در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که در واقعیت، توزیع نانوساختاری اجزایی مانند CNT و گرافن در ماتریس اپوکسی سبب ایجاد ناهمگنی‌های موضعی در گذردهی و رسانندگی الکتریکی می‌شود که می‌تواند منجر به تغییرات موضعی در توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی گردد. علاوه بر این، مدل‌های تحلیلی اغلب اثرات پیچیده‌ای نظیر پراکندگی چندگانه، کوپلینگ نزدیک میان نانوپرکننده‌ها، و تغییرات فضایی میدان در مرز لایه‌ها را به‌صورت تقریبی یا میانگین‌گیری شده لحاظ می‌کنند. در مقابل، حل عددی مبتنی بر روش‌های تمام‌موج قادر است تمامی این برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی و اثرات مرزی را با دقت بیشتری در نظر بگیرد. با افزایش فرکانس به سمت ۹.۵ و ۱۰ گیگاهرتز مقدار RL افزایش یافته و به حدود ۲- تا ۳- دسی‌بل می‌رسد که بیانگر کاهش شرایط تطبیق امپدانس و در نتیجه افزایش بازتاب موج الکترومغناطیسی است. در این محدوده اختلاف بین دو روش به حدود ۹ تا ۱۲ درصد محدود می‌شود که هم‌چنان در محدوده قابل قبول برای مدل‌های نیمه‌تحلیلی در ساختارهای متامتریال و جاذب‌های کامپوزیتی قرار دارد. در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰.۵ گیگاهرتز نیز روند کلی هر دو منحنی تقریباً هم‌رفتار باقی می‌ماند و مقدار RL به تدریج به سمت مقادیر نزدیک صفر دسی‌بل حرکت می‌کند که نشان‌دهنده تضعیف مکانیزم‌های اتلاف و کاهش کوپلینگ میدان در ساختار است. بیشترین اختلاف نسبی در لبه‌های باند فرکانسی، به‌ویژه در ۸ و ۱۲ گیگاهرتز مشاهده می‌شود که به حدود ۱۴ تا ۱۵ درصد می‌رسد و معمولاً ناشی از اثرات مرزی باند، پراکندگی هندسی و محدودیت‌های تقریب‌های مورد استفاده در مدل تحلیلی است. با این حال، هم‌خوانی مناسب موقعیت رزونانس، شکل کلی منحنی و دامنه تغییرات RL نشان می‌دهد که مدل تحلیلی توانایی پیش‌بینی رفتار فیزیکی ساختار جاذب را با دقت قابل قبول دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار سریع برای تخمین پاسخ فرکانسی و تحلیل اولیه طراحی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶: صحت‌سنجی نتایج حاصل از حل تحلیلی و عددی ساختار سه لایه جاذب

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک جاذب الکترومغناطیسی چندلایه شامل لایه سطحی Graphene/Epoxy، هسته متخلخل CNT/Epoxy و صفحه آلومینیومی پشتی، با ضخامت کل حدود ۷ میلی‌متر در باند X طراحی و تحلیل شد. هدف اصلی ایجاد تطابق امپدانس و افزایش اتلاف موج در ساختار بود.

برای ارزیابی جامع، هر دو حل عددی و حل تحلیلی مبتنی بر مدل خط‌انتقال و محیط مؤثر مورد استفاده قرار گرفتند. مقایسه نتایج نشان داد که روند نمودارهای تحلیل تحلیلی و عددی مشابه هستند، اما با اختلاف کنترل‌شده ۵ تا ۱۵ درصد. این اختلاف مطابق انتظار در لبه‌های باند بیشتر و در نزدیک رزونانس کمتر ظاهر شد. نمودارهای تحلیلی نیز همان پیک اصلی را نشان می‌دهند اما با عمق کمتر و اندکی جابه‌جایی فرکانسی، که مربوط به ساده‌سازی‌های مدل تحلیلی (همگن‌سازی، میانگین‌گیری در مدل‌های کلاسیک محیط مؤثر ماکسول، عدم لحاظ اثرات لبه‌ای) است.

در تحلیل عددی، پارامتر کاهش انعکاس در حوالی ۹ گیگاهرتز به مقدار حدود ۱۸.۸- دسی‌بل رسید. حل تحلیلی نیز همین رزونانس را تأیید کرد اما مقدار آن حدود ۲۱- دسی‌بل بود که نشان‌دهنده رفتار مشابه ولی با دقت کمتر است. روند تغییرات در کل باند X نیز بین دو مدل همخوانی خوبی داشت و هر دو نشان دادند که ساختار در محدوده وسیعی از باند مقدار کاهش انعکاس کمتر از ۱۰- دسی‌بل ایجاد می‌کند.

به منظور بررسی پایداری عملکرد ساختار، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر ضخامت لایه‌ها نیز انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر توزیع ضخامت میان لایه سطحی Graphene/Epoxy و هسته CNT/Epoxy می‌تواند موجب جابه‌جایی فرکانس بیشینه جذب شود. به طور مشخص، افزایش ضخامت لایه سطحی موجب انتقال پیک کاهش انعکاس به حدود ۸.۵ گیگاهرتز شد، در حالی که افزایش ضخامت هسته متخلخل باعث انتقال این پیک به حدود ۹.۵ گیگاهرتز گردید. این نتایج نشان می‌دهد که ضخامت لایه‌ها نقش مهمی در تنظیم شرایط رزونانس و بهینه‌سازی عملکرد جذب دارد. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب لایه تنظیم‌کننده امپدانس

Graphene/Epoxy با هسته متخلخل CNT/Epoxy می‌تواند به ایجاد جذب مؤثر در باند X منجر شود و مقدار کاهش انعکاس در فرکانس رزونانس به حدود ۱۸- تا ۱۹- دسی‌بل برسد. با وجود آن که چارچوب تحلیلی-عددی ارائه شده قادر است رفتار جذب الکترومغناطیسی ساختار پیشنهادی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند، این مطالعه همچنان با چند محدودیت مدل‌سازی همراه است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرند. در این پژوهش، خواص الکترومغناطیسی لایه‌های کامپوزیتی بر اساس مدل محیط مؤثر در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که در مواد واقعی، توزیع نانولوله‌های کربنی، درجه تجمع (agglomeration)، ناهمسانگردی جهت‌گیری CNTs و تغییرات محلی در چگالی تخلخل می‌تواند منجر به ناهمگنی‌های ریزساختاری قابل توجهی شود که رفتار قطبش الکتریکی و مسیرهای رسانش را در مقیاس میکرو و نانو تغییر می‌دهد. علاوه بر این، مدل حاضر عمدتاً بر پایه تابش موج تخت در شرایط عمود بر سطح و در یک سلول دوره‌ای ایده‌آل توسعه یافته است؛ در حالی که در کاربردهای عملی، زاویه تابش موج، قطبش‌های مختلف، و برهم‌کنش‌های میدان در آرایه‌های محدود می‌توانند موجب تغییر در تطابق امپدانس و مکانیزم‌های تضعیف شوند. از سوی دیگر، در مدل عددی اثرات پراکندگی چندمقیاسی، زبری سطحی، تغییرات پارامترهای ماده با دما، و وابستگی دقیق رسانندگی نانوساختارها به فرکانس و میدان موضعی به صورت ساده‌شده لحاظ شده‌اند که می‌تواند در برخی شرایط منجر به اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی شود. بر این اساس، در تحقیقات آینده می‌توان با توسعه مدل‌های چندفیزیکی پیشرفته‌تر که همزمان برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی، حرارتی و ساختاری را در نظر می‌گیرند، اثر ناهمگنی‌های ریزساختاری، جهت‌گیری آماری CNTs و تغییرات فضایی تخلخل را به‌طور دقیق‌تر بررسی کرد. هم‌چنین مطالعه پاسخ ساختار در زاویه‌های تابش مایل، قطبش‌های مختلف و شرایط محیطی متغیر می‌تواند درک جامع‌تری از پایداری عملکرد جاذب فراهم سازد. از منظر طراحی نیز بهره‌گیری از فراسطح‌ها (Metasurfaces)، الگوهای زیرموجی چندمقیاسی، و هندسه‌های دوره‌ای پیچیده‌تر می‌تواند امکان مهندسی دقیق امپدانس سطحی و ایجاد تشدیدهای چندگانه را فراهم کرده و در نتیجه به افزایش پهنای باند جذب و بهبود کارایی کلی جاذب منجر شود. در نهایت، ساخت نمونه آزمایشگاهی و انجام اندازه‌گیری‌های تجربی در باند X، از جمله اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی در موج‌بر یا اتاق بدون بازتاب، گام ضروری برای اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی و عددی ارائه‌شده محسوب می‌شود و می‌تواند مسیر توسعه این نوع جاذب‌های نانوساختار را برای کاربرد در سامانه‌های مایکروویوی، مخابراتی و الکترونیک فرکانس بالا هموار سازد.

۶- تشکر و قدردانی

در این قسمت نویسندگان می‌توانند در صورت لزوم مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان تحقیق که به صورت غیرمستقیم در پیشبرد آن نقش داشته‌اند، بیان کنند.

۷- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این،

موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۸- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۹- منابع

- [1] Lu, Z., Liu, L., Chen, Z., Wang, C., Zhu, X., Lu, X., Yuan, H., & Huang, H. (2025). Progress in electromagnetic wave absorption of multifunctional structured metamaterials. *Polymers*, 17(18), 2559. <https://doi.org/10.3390/polym17182559>
- [2] Zecchi, S., Cristoforo, G., Bartoli, M., Tagliaferro, A., Torsello, D., Rosso, C., Boccaccio, M., & Acerra, F. (2024). A comprehensive review of electromagnetic interference shielding composite materials. *Micromachines*, 15(2), 187. <https://doi.org/10.3390/mi15020187>
- [3] Parveen, A., Irshad, A., U.-e.-Kalsoom, & Shah, M. N. U. (2025). Advancing electromagnetic wave absorption in metamaterials: Progress, challenges, theoretical background, and advanced technological applications. *Advanced Materials Technologies*, 10(20). <https://doi.org/10.1002/admt.202500710>
- [4] Du, Y., Liu, Y., Wang, A., & Kong, J. (2023). Research progress and future perspectives on electromagnetic wave absorption of fibrous materials. *iScience*, 26(10), 107873. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107873>
- [5] Sun, Q., Li, S., Jin, L., Xiao, J., Wulin, T., Hou, X., & Zhang, X. (2025). Lightweight and high-performance electromagnetic wave absorbers based on hollow glass microspheres and carbon-supported Ni-Co composites. *Coatings*, 15(7), 775. <https://doi.org/10.3390/coatings15070775>
- [6] Wu, C., Liu, Y., & Zhao, G. (2024). Carbon nanospheres for electromagnetic wave absorption and shielding. *ACS Applied Nano Materials*, 7(8), 8926–8938. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c00438>
- [7] Chen, C., Pu, N., Liu, Y., Huang, S., Wu, C., Ger, M., Gong, Y., & Chou, Y. (2017). Remarkable microwave absorption performance of graphene at a very low loading ratio. *Composites Part B: Engineering*, 114, 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.016>
- [8] Munir, A. (2017). Microwave radar absorbing properties of multiwalled carbon nanotube polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*, 36(3), 362–370. <https://doi.org/10.1002/adv.21617>

- [9] Zhao, H., Cheng, Y., Liu, W., et al. (2019). Biomass-derived porous carbon-based nanostructures for microwave absorption. *Nano-Micro Letters*, 11, 24. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0255-3>
- [10] Zhou, Z., Yan, Y., Liu, J., He, Z., & Wang, Y. (2025). Porous biomass carbon composites derived from Canadian goldenrod and their excellent microwave absorption. *Applied Sciences*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/app15179474>
- [11] Du, J., Li, T., Li, J., et al. (2025). Design of flexible MXene/graphene-based fiber fabrics for broadband electromagnetic wave absorption. *Advanced Fiber Materials*, 7, 811–826. <https://doi.org/10.1007/s42765-025-00523-y>
- [12] Zhang, C., Yang, W., Jiang, B., et al. (2025). Structure-driven design of cellular graphene/polystyrene composites with balanced dielectric loss and impedance matching for multiband electromagnetic wave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 517, 164290. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164290>
- [13] Khakbaz, M., Motavasselolhagh, M., Javadi, M., & Sarkhosh, R. (2026). Experimental evaluation of combining a two-phase nanocomposite containing Al_2O_3 and NbC in a surface-coated resin matrix: A study based on dielectric losses and radar reflectance. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. <https://doi.org/10.22075/mac.2026.38962.1918>
- [14] Zhao, Q., Li, F., & Liu, J. (2024). Analytical modeling of wave absorption performance in gradient graphene/polymer nanocomposites. *Materials*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/ma17122946>
- [15] Khakbaz, M., Javadi, M., & Sarkhosh, R. (2025). Investigation of radar cross-section reduction of quadratic and conic aluminum surfaces in the X-band frequency range. *Mechanics of Structures and Fluids*, 15(2), 65–80. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2025.15682.3937> (In Persian)
- [16] Qobadi, N., Hoseini Moradi, S. A., & Farkhzadi, M. (2022). Synthesis and characterization of nickel–graphene ferrites as electromagnetic wave phase shifters in radar systems. *Aerospace Defense Journal*, 1(3), 66–82. <https://doi.org/20.1001.1.28211553.1401.1.3.5.6> (In Persian)
- [17] Caloz, C., & Itoh, T. (2005). *Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications*. Wiley.
- [18] Sarkhosh, R., Kazemi Nasrabadi, M., & ParsaFar, R. (2024). Study of the effect of fumed silica on mechanical, electrical, and magnetic properties of epoxy/fumed silica composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 11(2), 37–57. (In Persian)
- [19] Liu, Y., Tai, R., Drew, M. G. B., & Liu, Y. (2017). Several theoretical perspectives of ferrite-based materials—Part 1:

Transmission line theory and microwave absorption. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 30, 2489–2504.
<https://doi.org/10.1007/s10948-017-4043-3>

- [20] Calderín, L., Karasiev, V., & Trickey, S. B. (2017). Kubo–Greenwood electrical conductivity formulation and implementation for projector augmented wave datasets. *Computer Physics Communications*, 221, 118–142.
<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.08.008>
- [21] Ivliev, S. V. (2017). The Kubo–Greenwood formula as a result of the random phase approximation for the electrons of metals. *Journal of Physics: Conference Series*, 941, 012047.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012047>