



## Research Paper;



# Calculation of Reflection Coefficient of Radar Absorbing Composite Lattice Grids Using Silica and Carbon Nanofibers

Hamidreza Alborznia <sup>1</sup>, Seyed Ali Hosseini Moradi<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Department of Physics, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

2. Department of Physics, Faculty of Basic Science, Khatam Al-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran.

### Article Information

### Abstract

**Accepted:**  
2025/04/04

**Received:**  
2025/01/09

### Keywords:

*Lightweight Radar-Absorbing Nanostructures, Periodic Moment Method, Reflection Coefficient*

### Corresponding Author:

Hamidreza Alborznia

### Email:

hamidrezaalborznia@gmail.com

Composite lattice grids reinforced with silica and carbon nanofibers filled with spongy materials can be used as lightweight radar absorbing nanostructures<sup>1</sup>. In this paper, a computational approach based on the Periodic Moment Method (PMM) has been developed to calculate the reflection coefficients of these composite lattice grids, and two different mechanisms for reflection reduction in these grids have been identified<sup>2</sup>. The results from this simulation mechanism indicate that at low frequencies, the reflection coefficients increase with the volume fraction of the grid cell wall<sup>3</sup>. At high frequencies, several diffraction lobes propagate away from the doubly periodic plane, and the reflection coefficients depend on both the cell wall volume fraction and the interelement distance<sup>4</sup>.

HOW TO CITE: S. A. Hamidreza Alborznia. (2025). Calculation of Reflection Coefficient of Radar Absorbing Composite Lattice Grids Using Silica and Carbon Nanofibers. *Aerospace Defense*. Vol4(Issue1), Page 121 – 129.



## فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

شماره ۱ دوره ۴  
بهار ۱۴۰۴  
صفحات ۱۲۹ - ۱۲۱



مقاله پژوهشی؛

# محاسبه ضریب بازتاب شبکه‌های مشبک کامپوزیتی جاذب رادار با استفاده از نانوالیاف سیلیس و کربن

حمیدرضا البرزنی<sup>۱</sup>، سید علی حسینی مرادی<sup>۲</sup>

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

شبکه‌های مشبک کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوالیاف سیلیس و کربن که با مواد اسفنجی پر شده‌اند، می‌توانند به عنوان نانو ساختارهای سبک‌وزن جاذب رادار به کار روند. در این مقاله، روش محاسباتی مبتنی بر روش ممان دوره‌ای (PMM) برای محاسبه ضرایب بازتاب این شبکه‌های مشبک کامپوزیتی توسعه داده شده و دو مکانیزم مختلف برای کاهش بازتاب در این شبکه‌ها شناسایی شده‌اند. نتایج حاصل از این مکانیزم شبیه‌سازی شده، بیانگر این است که در فرکانس‌های پایین، ضرایب بازتاب با افزایش کسر حجمی دیواره سلولی شبکه افزایش می‌یابد. در فرکانس‌های بالا، چندین لوب پراش از صفحه دوگانه دوره‌ای دور می‌شوند و ضرایب بازتاب به هر دو کسر حجمی دیواره سلولی و فاصله بین عناصر بستگی دارد.

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۲۰

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۱/۱۵

### کلیدواژه‌ها:

نانوساختارهای سبک  
جاذب رادار، روش  
گشتاور تناوبی، ضریب  
بازتاب

### نویسنده مسئول:

حمیدرضا البرزنی

### ایمیل:

hamidrezaalborznia@gmail.com

**استناد:** حمیدرضا البرزنی، سید علی حسینی مرادی (۱۴۰۴). محاسبه ضریب بازتاب شبکه‌های مشبک کامپوزیتی جاذب رادار با استفاده از نانوالیاف سیلیس و کربن، دفاع هوافضایی دوره ۴ (شماره ۱)، صفحه ۱۲۹-۱۲۱.

## ۱- مقدمه

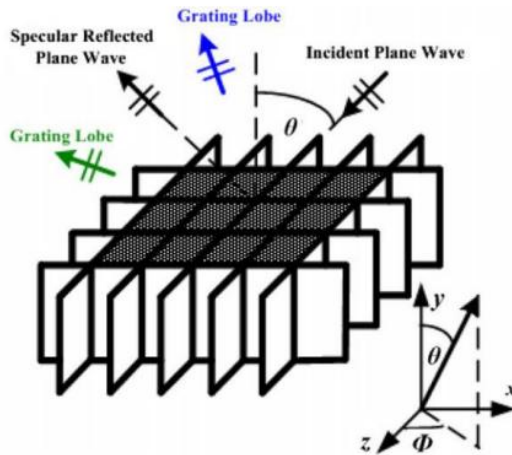
مواد جاذب رادار (RAM) به طور گسترده‌ای در بسیاری از زمینه‌ها، به ویژه در کاربردهای نظامی، استفاده می‌شوند. مواد جاذب رادار سنتی مانند پوشش‌های مخفی‌کاری برای هواپیماها و انواع مختلف جاذب‌های فومی در اتاق‌های تاریک به خوبی توسعه یافته‌اند. با این حال، این مواد یا بسیار شکننده هستند یا انعطاف‌پذیر و قادر به تحمل بار نیستند [۱]. علاوه بر این، پوشش‌های مخفی‌کاری وزن اضافی نامطلوبی به هواپیماها اضافه می‌کنند و هزینه‌های نگهداری بالایی دارند. ساختارهای جاذب رادار (RAS) از اواخر قرن گذشته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. طراحی RAS شامل در نظر گرفتن توانایی تحمل بار و همچنین جذب رادار است. برای ساختارهای مورد استفاده در هواپیما، سبک بودن نیز یک عامل مهم است. با ترکیب کربن سیاه رسانا یا نانولوله‌های کربنی با ماتریس چسباننده کامپوزیت شیشه/اپوکسی، RAS جامد ساخته شده است [۲]. این نوع RAS جامد به دلیل چگالی بالا، ساختار کارآمدی نیست. ساختارهای متخلخل مانند فوم‌های کربن - سیلیس و فوم‌های پلی‌اورتان با کربن سیاه یا نانولوله‌های کربنی نیز به عنوان RAS مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به عنوان ساختارهای متخلخل، شبکه‌های مشبک برای تحمل بار کارآمدتر از فوم‌ها هستند. شبکه‌های مشبک در دو جهت ارتوتروپیک یک صفحه دوره‌ای هستند و در جهت سوم ضخامت محدودی دارند. آن‌ها دارای خواص مکانیکی برتری مانند سفتی و استحکام ویژه بالا هستند که می‌توانند به عنوان هسته‌های ساختارهای ساندویچی استفاده شوند. نسبت تخلخل بالا، پتانسیل‌های زیادی در طراحی چندمنظوره فراهم می‌کند [۳-۶].

اخیراً، شبکه‌های مشبک کامپوزیتی تقویت شده با الیاف سیلیس و الیاف کربن که با فوم‌های سبک جاذب رادار پر شده‌اند، به عنوان RAS طراحی شده‌اند. اندازه‌گیری‌های ضریب بازتاب، عملکرد برجسته جذب رادار آن‌ها را نشان می‌دهد [۷-۱۰]. با این حال، اندازه‌گیری‌های تجربی در فرآیند طراحی زمان‌بر و منابع‌بر هستند. توسعه یک روش محاسباتی برای ضریب بازتاب ارزش زیادی دارد. طول مشخصه سلول واحد شبکه معمولاً در همان مرتبه طول موج عملیاتی است. نظریه خط انتقال و روش ماتریس انتقال بر اساس نظریه محیط مؤثر در چنین مواردی ناکام هستند.

کدهای محاسباتی FDTD و FEM بر اساس حل معادلات دیفرانسیل به اندازه روش ممان (MOM) در مواجهه با مسائل پراکندگی در فضای بی‌نهایت کارآمد نیستند. روش ممان دوره‌ای (PMM) برای شبیه‌سازی پراکندگی از RAM های گوه‌ای و هرمی ایجاد شده است و بازتاب کل (TRB) به طور غیرمستقیم با ترکیب PMM با نظریه خط انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، روش محاسباتی مبتنی بر روش ممان دوره‌ای (PMM) برای محاسبه ضرایب بازتاب این شبکه‌های مشبک کامپوزیتی مبتنی بر دو مکانیزم مختلف برای کاهش بازتاب در این شبکه‌ها استفاده می‌گردد [۱۱-۱۴].

## ۲- روش محاسباتی و مدل سازی

طبق استاندارد GJB 2038-94، اندازه‌گیری ضریب بازتاب در شرایط تابش موج صفحه‌ای انجام می‌شود [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۱، نشان داده شده است هنگامی که یک موج صفحه‌ای هارمونیک زمانی به یک ساختار دوگانه دوره‌ای بی‌نهایت با بازتاب کامل تأیید می‌شود، چندین لوب پراش و همچنین موج بازتابی آینه‌ای در میدان دور پراکندگی مشاهده می‌شود.



شکل (۱): طرحی کلی میدان دور پراکندگی یک ساختار دوگانه دوره‌ای بی‌نهایت با بازتاب کامل

برای شبیه‌سازی این الگوی پراکندگی، مواد دی‌الکتریک می‌توانند با فضای آزاد و مجموعه‌ای از جریان‌های حجمی الکتریکی معادل جایگزین شوند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۶]:

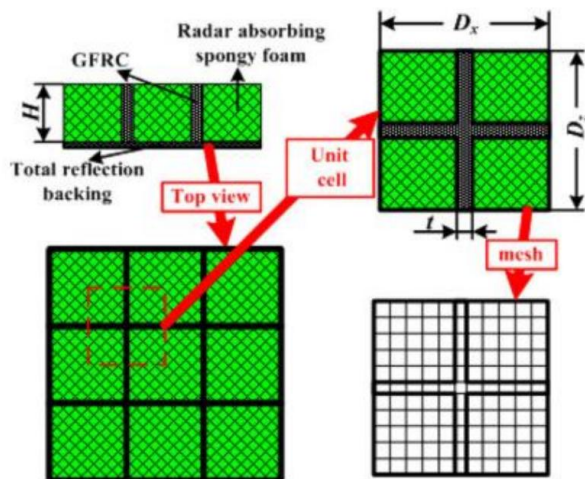
$$\vec{J}^s = j\omega[\epsilon(\mathbf{R}) - \epsilon_0]\vec{E} \quad (1)$$

$\epsilon(\mathbf{R})$  نشان‌دهنده گذردهی ماده دی‌الکتریک و  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی فضای آزاد است. برای ساختارهای دوبل پرپدیگ راه‌حل PMM برای میدان دور پراکندگی می‌تواند به شکل زیر نوشته شود [۱۷-۱۹]:

$$\vec{E}^s(\vec{R}) = \frac{Z_0}{2D_x D_z} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \iiint_{ref} \hat{r} + \times [\vec{J}^s(\vec{R}')] \frac{e^{-ik+(\vec{R}-\vec{R}')}}{r_y} dv \quad (2)$$

که  $D_x$  و  $D_z$  فواصل بین عناصر در جهت‌های  $\mathbf{X}$  و  $\mathbf{Z}$  هستند، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است.  $k$  بردار جهت موج ورودی و  $k_0$  ثابت انتشار در فضای آزاد را نشان می‌دهد.  $Z_0$  امپدانس موج در فضای آزاد می‌باشد و  $\hat{S} = S_x \hat{x} + S_y \hat{y} + S_z \hat{z}$  بردار جهت موج ورودی است

[۲۰]:



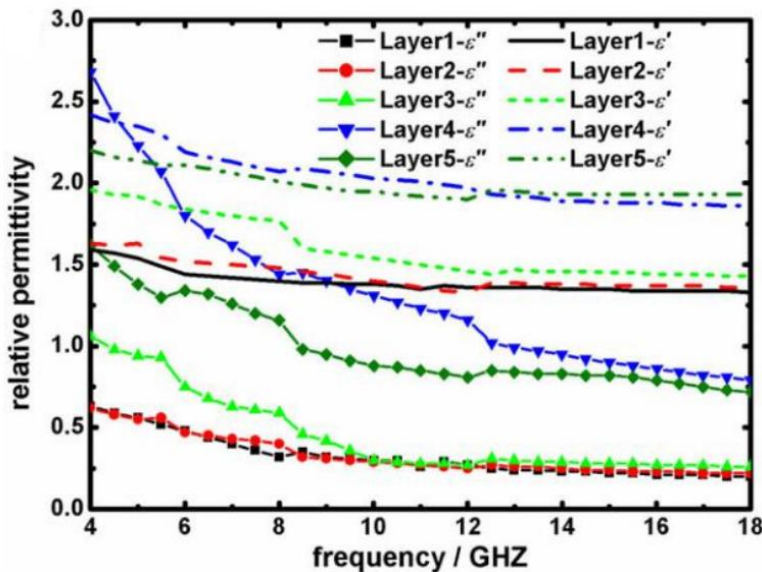
شکل (۲): طرحی از شبکه مربعی GFRC پر شده با فوم اسفنجی جاذب رادار در مش بندی سلول واحد همچنین در رابطه (۲)،  $r_y$  که به صورت رابطه زیر تعریف می شود [۲۱]:

$$r_y = \begin{cases} \sqrt{1 - r_x^2 - r_z^2}, & r_x^2 + r_z^2 \leq 1 \\ -j\sqrt{r_x^2 + r_z^2 - 1}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

به عدد موهومی تبدیل می شود و لوب شبکه مربوطه به صورت نمایی با  $y$  کاهش می یابد و به میدان دور پراکندگی کمکی نمی کند. بنابراین، جمع دو گانه بی نهایت در معادله (۲) می تواند با جمع محدود چندین آیتم جایگزین شود، به طوری که  $p = q = 0$  موج بازتابی آینه ای را نشان می دهد و بقیه نشان دهنده لوب های شبکه ای غیر تضعیف شونده هستند. در این مقاله، ضرایب بازتاب شبکه های مربعی GFRC پر شده با فوم جاذب رادار را محاسبه می کنیم. طرح شبکه مربعی جاذب رادار در شکل ۲ نشان داده شده است. در این روش یک سلول واحد از شبکه به عنوان عنصر مرجع PMM انتخاب شده و با زیرمیدان های مکعبی متعدد برای انتگرال بسته در معادله (۲) مش بندی می شود [۲۲]. در این مدل سازی تنها با برخورد عمودی ( $\theta = 0$ ) در شکل ۱) مانند اکثر اندازه گیری های تجربی سروکار داریم. و یک صفحه تخت با گذردهی  $\epsilon = 1 - 5000j$  و ضخامت ۱ میلی متر برای شبیه سازی TRB در برنامه PMM را در نظر می گیریم.

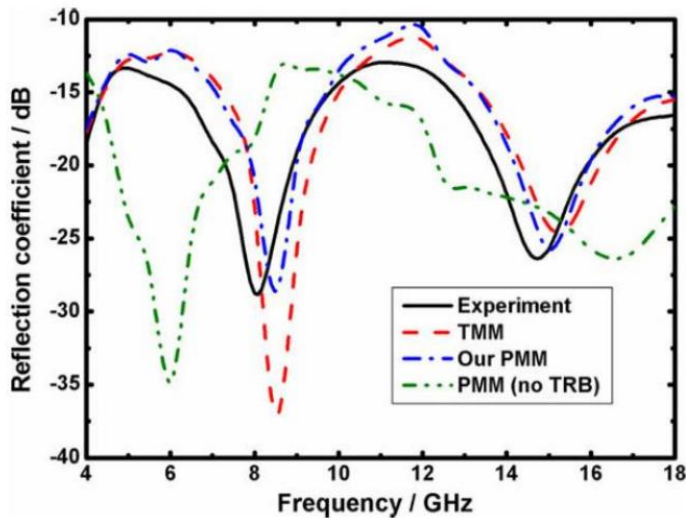
### ۳- تجزیه و تحلیل

فوم اسفنجی جاذب راداری که در شبکه‌های مشبک قرار گرفته است، یک ماده جاذب راداری گرا دیان اتلاف دی‌الکتریک ۵ لایه با چگالی حدود ۰.۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. این فوم به دلیل ساختار چندلایه‌ای خود، توانایی جذب امواج راداری را دارد. هر لایه از این فوم دارای ضخامت ۴ میلی‌متر است و مقدار  $H$  در شکل ۲ برابر با ۲ سانتی‌متر است. عکس و اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک هر لایه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده برای فوم اسفنجی جاذب راداری استفاده شده در ۵ لایه

ضرایب بازتاب این فوم توسط برنامه شبیه‌سازی PMM و روش ماتریس انتقال (TMM) محاسبه شده‌اند. نتایج این محاسبات با نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شده‌اند که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار مقایسه ضریب‌های بازتاب فوم جاذب رادار اسفنجی توسط روش شبیه‌سازی PMM و در این تحقیق با روش شبیه‌سازی TMM و روش تجربی.

با توجه به نمودار بازتاب عملکرد فوم در محدوده فرکانسی نشان می‌دهد این فوم می‌تواند کاهش بازتاب زیر ۱۰- دسی‌بل را در محدوده فرکانسی ۴-۱۸ گیگاهرتز به دست آورد. این نشان‌دهنده عملکرد خوب فوم در جذب امواج راداری در این محدوده فرکانسی است. مقایسه روش‌های محاسباتی نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی PMM با پشتیبانی بازتاب کامل با نتایج اندازه‌گیری و روش TMM مطابقت خوبی دارد. با این حال، شبیه‌سازی PMM بدون پشتیبانی بازتاب کامل شبیه‌سازی دقیقی برای اندازه‌گیری استاندارد نیست. این نتایج برنامه شبیه‌سازی PMM و روش پشتیبانی بازتاب کامل در این تحقیق را تأیید می‌کنند.

#### ۴-تشریح و قدردانی

به پاس الطاف بی‌دریغ و همّت والایان، صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را تقدیم می‌دارم و قدردان بزرگواری و فضل شما هستم.

#### ۵-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.

## ۶- 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.

## ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه، ما بازتاب کامل را در PMM با مدل‌سازی آن به عنوان یک ماده دی‌الکتریک با بخش موهومی بزرگ از گذردهی، یکپارچه کرده‌ایم. این روش امکان مشاهده لوب‌های پراش در میدان دور پراکندگی از ساختارهای دوبل دوره‌ای را فراهم کرد. نتایج محاسبات ما نشان می‌دهد که شبکه‌های جاذب رادار تقویت‌شده با GFRC (کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه) می‌توانند بازتاب‌ها را به کمتر از ۱۰- دسی‌بل در یک بازه فرکانسی گسترده از ۴ تا ۱۸ گیگاهرتز کاهش دهند. این کاهش قابل توجه، پتانسیل این مواد را برای کاربردهای پیشرفته جذب رادار نشان می‌دهد. در فرکانس‌های پایین‌تر، جایی که لوب‌های پراش از صفحه دوبل دوره‌ای دور نمی‌شوند، بازتاب با افزایش کسر حجمی GFRC افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که کسر حجمی GFRC یک پارامتر حیاتی در تأثیرگذاری بر خواص بازتابی در این فرکانس‌ها است. در مقابل، در فرکانس‌های بالاتر، هم کسر حجمی GFRC و هم فاصله بین عناصر در تعیین ضریب‌های پراکندگی لوب‌های پراش و بازتاب اهمیت دارند. این وابستگی دوگانه پیچیدگی بهینه‌سازی مواد جاذب رادار برای کاربردهای فرکانس بالا را نشان می‌دهد. به طور کلی، یافته‌های ما بر اهمیت در نظر گرفتن هر دو ترکیب مواد و پارامترهای ساختاری در طراحی مواد جاذب رادار مؤثر تأکید می‌کند. این بینش‌ها می‌تواند پایه‌ای برای توسعه‌های آینده در این زمینه باشد، به ویژه برای کاربردهایی که نیاز به پوشش فرکانسی گسترده و بازتاب حداقلی دارند.

## ۸-مراجع

- [1] Vinoy K.J, and Jha R.M, Radar absorbing materials- From theory to design and characterization(Book). Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] Oh J.-H., et al., Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges. *Composites Part B: Engineering*, 2004. 35(1): p. 49-56.
- [3] Zhang Y, Fan H, and Fang D 2008 *Composites Science and Technology* 68 15 p. 3299-3304.
- [4] Alborzania H, Naseri M and Fatahi N, 2019 *Optik* 180 125.
- [5] Fan H, Yang W, and Chao Z 2007 *Composites Science and Technology* 67 15 p. 3472-3479.
- [6] Alborzania H, Amirian S and Mohammadi S T 2021 *Journal of Research on Many-body Systems* 11 1.
- [7] Alborzania H, 2022 *Surf. Rev. Lett.* 29 2250078.
- [8] Hosseini Moradi S A and Alborzania H, 2023 *Aerospace Defense* 2 1-16.
- [۹] Alborzania H R, and Mohammadi S T, 2021 *Bull. Mater. Sci.* 44 180.
- [۱۰] Hassanpoor H, Dostimotlagh S N, Alborzania H, 2023 *Radar* 11 1.
- [۱۱] Alborzania H R and Mohammadi S T, 2020 *Iran. J. Phys. Res.* 20 259.
- [۱۲] Ram B and Mizuseki H, 2018 *Carbon* 137 266.
- [۱۳] Alborzania H, Amirian S, Nazirzadeh M, 2022 *Optical and Quantum Electronics* 54 10 608.
- [۱۴] Evans A, 2001 *MRS bulletin* 26 10 p. 790-797.
- [۱۵] Hoat D M, Amirian S, Alborzania H, Laref A, Reshak A H and Naseri M 2021 *Indian J. Phys* 95 2365.
- [۱۶] Celik F A, 2022 *Bull. Mater. Sci.* 45 108
- [۱۷] Alborzania H and Mohammadi S T, 2022 *Indian J. phys.* 32 2
- [۱۸] Rajbanshi B, Sarkar S, Mandal B, Sarkar P, 2016 *Carbon* 100 118-125.
- [۱۹] Alborzania H, Naseri M and Fatahi N, 2019 *Superlattice Microstruct.* 133 106217
- [۲۰] Saleh B E A, and Teich M C ,1991 *Fundamentals of Photonics, Wiley, New York, Chapter* 15 542
- [21] Amirian S, Alborzania H, Yalameha S, 2024 *Solid State Communications* 394 115693.
- [22] Alborzania H, and Hosseini Moradi S A, 2023 *Aerospace Defense* 1-11.