

## Effect of Penetration Depth and Thickness on the Performance of Nanocomposite Shield Made in the Frequency Band 8-12.5 GHz

Rohollah Fallah Madvari<sup>1</sup>, Hamideh Bidel<sup>2</sup>, Sedigheh Hosseinabadi<sup>3</sup>,  
Gholamhossein Pourtaghi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Health Research Center, Life Style Institute, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Occupational Health and Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Research Center for Health Sciences and Technologies, School of Health, Semnan University of Medical Sciences, Semnan, Iran

Received: 10 March 2021 Accepted: 3 August 2021

### Abstract

**Background and Aim:** Due to the adverse effects of exposure to electromagnetic waves on humans and equipment, engineering controls such as the use of shields are one of the best ways to control and reduce exposure to electromagnetic waves. There are various methods to evaluate the performance of electromagnetic shields. The aim of this study was to investigate the effect of shield penetration depth and thickness on the performance of nanocomposites.

**Methods:** In this study, paraffin wax was used as a matrix and black carbon spherical nanoparticles and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> were used as filler. Two nanocomposite samples were made with different weight percentages of fillers. The electromagnetic properties of nanocomposites made were measured using a Vector Network Analyzer in the frequency range of 8-12.5 GHz (X) based on the transfer/reflection method. The Delta function was used to evaluate the shielding protective performance at different thicknesses and frequencies.

**Results:** Based on the weight percentage of nanocomposite constituents, two samples were obtained. The highest penetration depth was observed in FN2 samples. Correlation between free space impedance and shield components was observed at the lowest shield thickness and at the initial frequencies. The lowest delta value was observed in the FN2 sample.

**Conclusion:** According to the Delta function, by increasing the absorption and decreasing the reflection in the shield, the protective efficiency of the shield increases. Shield thickness and frequency of electromagnetic waves affect the protective performance of the shield. Increasing the match of impedance between free space and shielding material increases the shield efficiency.

---

**Keywords:** Electromagnetic waves, Nanocomposite, Impedance matching, Delta Function.

## بررسی اثر عمق نفوذ و ضخامت بر کارایی سپر نانو کامپوزیت ساخته شده در باند فرکانسی ۸-۱۲ گیگاهرتز

روح‌اله فلاح‌مدواری<sup>۱</sup>، حمیده بیدل<sup>۲</sup>، صدیقه حسین‌آبادی<sup>۳</sup>، غلامحسین پورتقی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>مرکز تحقیقات بهداشت نظامی، پژوهشکده سبک زندگی، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>مرکز تحقیقات علوم بهداشتی و فن‌آوری، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

**زمینه و هدف:** با توجه به اثرات نامطلوب مواجهه با امواج الکترومغناطیس بر انسان و تجهیزات، کنترل‌های مهندسی مثل استفاده از سپرهای حفاظتی (شیلد) از بهترین روش‌های کنترل و کاهش مواجهه با امواج الکترومغناطیس هستند. روش‌های متنوعی جهت ارزیابی کارایی شیلدهای الکترومغناطیس وجود دارد. این مطالعه باهدف بررسی اثر عمق نفوذ شیلد و ضخامت بر کارایی نانو کامپوزیت انجام شد. **روش‌ها:** در این مطالعه از پارافین واکس به عنوان ماتریس و از نانو ذرات کروی کربن سیاه و  $Fe_3O_4$  به عنوان فیلر استفاده شد. دو نمونه نانو کامپوزیت با درصد‌های وزنی متفاوت مواد پرکننده ساخته شدند. اندازه‌گیری خصوصیات الکترومغناطیسی نانو کامپوزیت‌های ساخته‌شده با استفاده از دستگاه آنالیزور شبکه برداری (Vector Network Analyzer) در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز (X) و بر اساس روش انتقال / بازتاب انجام شد. از روش دلتا جهت ارزیابی کارایی محافظتی شیلد در ضخامت‌ها و فرکانس‌های مختلف استفاده شد.

**یافته‌ها:** بر اساس درصد وزنی ترکیبات تشکیل‌دهنده نانو کامپوزیت، دو نمونه به دست آمد. بیشترین عمق نفوذ در نمونه FN2 دیده شد. تطابق بین مقاومت محیط و اجزای شیلد در کمترین ضخامت شیلد و در فرکانس‌های اولیه مشاهده شد. کمترین مقدار دلتا در نمونه FN2 مشاهده شد.

**نتیجه‌گیری:** بر اساس روش دلتا، با افزایش جذب و کاهش انعکاس در شیلد، کارایی محافظتی شیلد افزایش می‌یابد. ضخامت شیلد و فرکانس امواج الکترومغناطیسی بر کارایی محافظتی شیلد تأثیر دارند. افزایش تطابق بین مقاومت محیط و مقاومت اجزای شیلد، باعث افزایش کارایی شیلد می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** امواج الکترومغناطیسی، نانو کامپوزیت، تطابق مقاومت، روش دلتا.

## مقدمه

و ایمن‌سازی سیستم‌ها و انسان از این امواج مورد نیاز است. حفاظت در برابر امواج الکترومغناطیس به صورت جذب/انعکاس امواج با استفاده از موادی صورت می‌گیرد که به عنوان مانع در برابر عبور امواج مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱،۳). بهترین ماده برای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس باید دارای رسانایی الکتریکی بالا (انعکاس امواج الکترومغناطیس) و نفوذپذیری مغناطیسی بالا (قدرت جذب بالای امواج الکترومغناطیس) باشد. وجود دو ویژگی رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی به ترتیب باعث مکانیسم‌های حفاظتی انعکاس و جذب در شیلد می-شود (۱،۱۰).

جهت ساخت و توسعه مواد جاذب امواج الکترومغناطیس با کارایی بالا، استفاده از مواد نانومغناطیس بسیار مورد توجه بوده است. سنتز آسان، سازگاری بالا با محیط زیست، خاصیت زیست تخریب پذیری بالا، کاربرد در کاتالیست مواد، جذب امواج الکترومغناطیس و تصفیه آب از ویژگی‌های مطلوب آهن است که باعث افزایش کاربرد آن در ساخت شیلدهای الکترومغناطیس شده است. در میان تمام اکسیدهای آهن،  $Fe_3O_4$  نانوساختار مغناطیسی است که به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مثل سهولت در سنتز، ماهیت فوق پارامغناطیسی، ثبات شیمیایی بالا و سمیت کم بیشترین کاربرد را در ساخت شیلدهای نانومغناطیسی دارد (۱۱،۱۲). ترکیب مواد مغناطیسی مثل  $Fe_3O_4$  (۱۵-۱۳) با نانو ذرات کربنی در ماتریس‌های پلیمری جهت ساخت شیلدهای محافظ امواج الکترومغناطیس بسیار کاربردی است. کیفیت محافظتی شیلد نانو کامپوزیت به خصوصیات ماده فعال آن (ماده پرکننده) و توزیع آن در ماتریس (پلیمر) بستگی دارد (۱۷،۱۶،۵).

کربن به دلیل ویژگی‌های مثل رسانا بودن الکتریکی، سبک بودن و ساختار نانویی آن به عنوان یک ماده ایده آل برای جذب امواج الکترومغناطیس و ساخت نانو کامپوزیت‌های محافظ در برابر امواج الکترومغناطیس کاربرد دارد (۱۸). نانو ذرات کربن، از جمله موادی هستند که به عنوان پرکننده (فیلر) در ساخت نانو کامپوزیت‌های محافظ استفاده می‌شود. ویژگی‌هایی مثل قیمت پایین، رسانایی الکتریکی، چگالی کم، پایداری شیمیایی و حرارتی، انعطاف‌پذیری بالا باعث افزایش کاربرد این ماده شده است (۱۹). ترکیبات کربن، به دلیل ثابت دی‌الکتریک بالایی که دارند بهترین گزینه برای جذب امواج الکترومغناطیس هستند (۲۰، ۱۵). ترکیب مواد کربنی به دلیل خاصیت الکتریکی که دارند با موادی که خاصیت مغناطیسی دارند باعث بیشترین کارایی در جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی می‌شود (۱۸). ترکیب مواد پرکننده رسانای الکتریکی و مواد مغناطیسی برای تقویت میرایی موج الکترومغناطیسی با استفاده از مکانیسم جذب، بسیار مؤثر است (۱۷). عملکرد شیلد الکترومغناطیس به طور قابل توجهی به خصوصیات مغناطیسی و دی‌الکتریک ذرات داخلی و فعل و انفعالات بین این ذرات بستگی دارد. به همین دلیل نانو کامپوزیت‌ها

در سال‌های اخیر، امواج الکترومغناطیسی در محدوده گیگاهرتز به عنوان یک عامل نگران‌کننده در نظر گرفته شده است. علیرغم فواید و کاربردهای زیاد امواج الکترومغناطیس، تداخل این امواج در تجهیزات، سیستم‌های بیولوژیکی، سیستم‌های فناوری اطلاعات، فناوری‌های ایمنی و دفاعی جزو معایب آن‌ها حساب می‌شود (۱). امواج الکترومغناطیسی با محدوده فرکانسی ۳۳۰-۱ گیگاهرتز از اهمیت زیادی برخوردارند؛ باند بسامدی X با فرکانس ۸/۵-۱۲ گیگاهرتز یکی از مهمترین باندهای فرکانسی است که کاربردهای فراوانی در زیرساخت‌های ارتباطی و هواشناسی دارد (۲). در اثر استفاده بسیار زیاد از امواج الکترومغناطیس در زندگی روزانه، صنعت و ارتباطات مقدار زیادی امواج الکترومغناطیسی ناخواسته در اتمسفر تولید می‌شود که باعث ایجاد مشکل بزرگی به نام تداخل الکترومغناطیسی (EMI: Electromagnetic Interference) می‌شود (۳). بنابراین با توجه به کاربرد گسترده این امواج بسیاری از کارگران در محیط کار و افراد در محیط زندگی در معرض امواج الکترومغناطیس قرار دارند. همچنین این امواج باعث ایجاد اختلال، عملکرد نامناسب و تداخل الکترومغناطیسی در تجهیزات الکتریکی یا الکترونیکی می‌شود. (۴،۵).

علیرغم فواید و مزایای زیادی که سیستم‌های ارتباطی وایرلس و تجهیزات الکترونیکی در زندگی انسان دارد؛ امواج الکترومغناطیس باعث تداخل در سیگنال‌های ورودی تجهیزات الکترونیکی شده و منجر به ایجاد نویز می‌شود که به عنوان آلودگی تداخل الکترومغناطیسی شناخته می‌شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که مواجهه با امواج الکترومغناطیس باعث تداخل و ایجاد اثرات نامطلوب بر سلامت انسان، پایداری و عملکرد صحیح تجهیزات ارتباطی، تجهیزات کاربردی و صنایع تمام خودکار می‌شوند. مواجهه طولانی مدت با شدت زیاد امواج الکترومغناطیس باعث ایجاد و گسترش مشکلات سلامتی در انسان می‌شود. مطالعات اثرات نامطلوب این امواج را بر ژنتیک و آسیب به DNA، باروری مردان، سرطان، اثرات نامطلوب قلبی عروقی، اثرات خونی، اثرات نامطلوب بر ذهن و اثرات بر سیستم ایمنی نشان می‌دهد (۲۶، ۱). آژانس بین‌المللی تحقیقات بر روی سرطان، امواج الکترومغناطیس را به‌عنوان سرطان‌زای احتمالی برای انسان مشخص کرده است (۷). اقدامات کنترلی بسیاری برای جلوگیری از مواجهه با امواج الکترومغناطیس وجود دارد. اقداماتی مثل کاهش زمان مواجهه، کاهش سطح مواجهه به سطوح مجاز، روش‌های مهندسی و همچنین استفاده از تجهیزات حفاظت فردی (۸). با توجه به ماهیت امواج الکترومغناطیسی و استفاده از روزافزون از این امواج در صنایع یا منازل، کنترل‌های مهندسی مثل استفاده از سپرهای حفاظتی (شیلد) از بهترین روش‌های کنترل و کاهش مواجهه با امواج الکترومغناطیس هستند (۹). بنابراین استفاده از مواد محافظ یا سپرهای حفاظتی در برابر امواج الکترومغناطیسی برای جداسازی

جدول-۱. ترکیب نمونه‌های نانوکامپوزیت براساس ترکیب وزنی مواد تشکیل‌دهنده

اجزای نانوکامپوزیت		
FN2	FN1	
%۵۰	%۱۵	درصد وزنی پرکننده دی‌الکتریکی (نانوذرات کربن)
%۱۵	%۵۰	درصد وزنی پرکننده مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ )

## روش‌ها

### سنتز نانوکامپوزیت

در این مطالعه از پلیمر پارافین واکس به عنوان ماتریس و از نانو ذرات کروی کربن و  $Fe_3O_4$  با اندازه ۵۰-۲۵ نانومتر (خلوص ۹۸٪) به‌عنوان ماده پرکننده ساخت شرکت US-Nanomaterial Research استفاده شد. قبل از ساخت نانوکامپوزیت‌ها، توزین مواد موردنیاز انجام شد و از کالیبراسیون و صحت عملکرد دستگاه‌های مورد نیاز اطمینان حاصل گردید.

در این مطالعه، ساخت نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از روش اختلاط مذاب (Melt Mixing) انجام شد. ترکیب وزنی مواد تشکیل‌دهنده نانوکامپوزیت به ترتیب ذکر شده در جدول ۱ است. مخلوط به‌دست‌آمده درون یک حفره با قطر خارجی و داخلی به ترتیب ۶/۹ و ۳ میلی‌متر، زیر فشار ۱۰ مگا پاسکال فشرده شدند (۲۷). از خشک کن به‌منظور حذف رطوبت نانو ذرات استفاده شد (۲۸). اختلاط مواد پرکننده به روش اختلاط مذاب با استفاده از Extruder (مدل Bra bender Co-25DS) با قطر پیچ ۲۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۴۰ میلی‌متر انجام شد. توزیع دما در اکسترودر (شامل شش منطقه حرارتی) به ترتیب ۱۶۰، ۱۶۵، ۱۷۰، ۱۷۵ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد (۲۹).

### اندازه‌گیری تداخل الکترومغناطیسی

اندازه‌گیری خصوصیات الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های ساخته شده با استفاده از دستگاه آنالیزور شبکه برداری (VNA- Agilent Co, USA) در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز (باند فرکانسی X) و بر اساس روش انتقال / بازتاب انجام شد. بدین منظور نمونه در یک Waveguide محوری با قطر داخلی و خارجی یکسان قرار گرفت. مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریکی مخلوط بر اساس روش Nicholson-Rose-Weir با استفاده از شاخص‌های پراکندگی استخراج شد (۳۰). شاخص  $SE_T$  برای نانوکامپوزیت‌های ساخته شده با استفاده از فرمول (۳۱) زیر و بر حسب dB محاسبه شد:

فرمول (۱):

$$SE_T = SEA + RL + B$$

در این فرمول:  $SE_A$  افت ناشی از جذب،  $RL$  افت ناشی از انعکاس و  $B$  افت انعکاسی چندگانه است. وقتی موج الکترومغناطیسی به شیلد برخورد می‌کند، بازتابی ایجاد می‌شود و قسمتی از موج از طریق سپر منتقل می‌شود. در طول انتقال،

حفاظتی توسط ذرات پرکننده دی‌الکتریک و مغناطیسی تهیه می‌شوند (۲۱).

وجود معایبی مثل وزن سنگین، قیمت بالا، مقاومت کم در برابر خوردگی و کارایی رضایت‌بخش در فرکانس‌های پایین استفاده از شیلدهای فلزی را با محدودیت مواجهه کرد که باعث شد استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری برای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی بسیار مورد توجه قرار بگیرد. پلیمرها به دلیل خاصیت سازش‌پذیری بالا، وزن سبک، قیمت پایین و مقاومت خوبی که در برابر خوردگی دارند یکی از بهترین گزینه‌ها برای ساخت شیلدهای محافظتی هستند. مطالعات از پلیمرهای مختلف برای ساخت شیلدهای حفاظتی در برابر امواج الکترومغناطیسی استفاده کرده‌اند. پلیمر پارافین واکس از جمله مواد هیدروکربنی و از مشتقات مواد نفتی است. این ماده مقاوم، ایمن، ارزان‌قیمت، غیر خورنده و دارای مقاومت شیمیایی و حرارتی بالا و در دسترس است. پلیمرهای پارافینی سازگاری بالایی با موادی که با آن‌ها در تماس هستند دارند. پارافین تغییرات حجمی کمی در حالت مذاب و قابلیت ذوب همگون دارد. به دلیل همین ویژگی در سیستم‌هایی که شکل ذوب یا انجماد طولانی‌مدت دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۲). اثر کلی محافظتی یا کارایی یک ماده (  $SE_T$ : Total shielding efficiency) حاصل اثر محافظتی ناشی از جذب (  $SE_A$ : Shielding via absorption) و انعکاس (  $SE_R$ : Shielding via reflection) است که به ویژگی‌های ساختاری ماده محافظ بستگی دارد. SET نشان می‌دهد که تا چه اندازه یک ماده محافظ باعث جلوگیری از عبور انرژی الکترومغناطیسی در یک فرکانس خاص می‌شود (۲۳). زمانی که امواج الکترومغناطیسی به سطح شیلد برخورد می‌کند قسمتی از آن منعکس می‌شود. در حالی که بخشی از امواج به صورت انرژی جذب و پراکنده می‌شود و قسمت باقیمانده امواج از طریق ماده محافظ منتقل می‌شود (۲۴). برای افزایش کارایی حفاظتی شیلد الکترومغناطیسی بر اساس روش دلتا، باید مکانیسم انعکاس محدود و مکانیسم جذب در شیلد افزایش یابد. این امر با به حداقل رساندن عدم تطابق بین مقاومت فضای آزاد و مقاومت مواد سازنده شیلد ممکن است. در ضخامت معین از شیلد زمانی که افت انعکاس به سمت صفر محدود می‌شود، حداکثر مقدار جذب رخ می‌دهد که در این حالت بهترین تطابق مقاومت بین فضای آزاد و اجزای شیلد دیده می‌شود که در آن مقدار قدرمطلق دلتا به سمت صفر میل می‌کند. در صورتی که مقدار قدرمطلق دلتا بیشتر از صفر شود، منجر به جذب ضعیف امواج الکترومغناطیسی می‌شود (۱، ۲۵، ۲۶). در ضخامت‌ها و فرکانس‌های مختلف جاذب، هرچقدر مقدار قدر مطلق دلتا به صفر نزدیک‌تر باشد، باعث حداکثر شدن مقدار جذب و در نتیجه افزایش کارایی شیلد می‌شود (۲۶). هدف از این مطالعه بررسی کارایی دو نمونه از نانوکامپوزیت بر اساس ترکیب وزنی مواد پرکننده آن است.

جذب در شیلد، نتیجه بهترین تطابق مقاومت است که در این حالت  $|\Delta|$  به سمت صفر می رود. در صورتیکه مقدار  $|\Delta|$  از صفر منحرف شود، جذب در شیلد ضعیف شده و در نتیجه کارایی شیلد افت میکند. مقدار  $\Delta$  تابع ضخامت شیلد و فرکانس امواج الکترومغناطیسی است. معادله دلتا به شرح زیر است (۱،۲۵):

فرمول (۳):

$$|\Delta| = |\sinh^2(Kfd) - M|$$

در این معادله  $K$  و  $M$  برابرند با:

فرمول (۴):

$$K = \frac{4\pi \sqrt{\mu' \epsilon'} \times \sin \left[ \frac{\delta_\epsilon + \delta_m}{2} \right]}{c \times \cos \delta_\epsilon \times \cos \delta_m}$$

$$M = \frac{4\epsilon' \mu' \cos \delta_\epsilon \times \cos \delta_m \sqrt{\mu' \epsilon'} \times \sin \left[ \frac{\delta_\epsilon + \delta_m}{2} \right]}{(\mu' \cos \delta_\epsilon - \epsilon' \cos \delta_m)^2 + \left[ \tan \frac{\delta_\epsilon - \delta_m}{2} \right]^2 (\mu' \cos \delta_\epsilon + \epsilon' \cos \delta_m)^2}$$

### نتایج

در این مطالعه کارایی محافظتی شیلد الکترومغناطیس در دو نمونه نانو کامپوزیت با درصد وزنی متفاوت از نانو ذرات کربن سیاه و آهن بررسی شد. محدوده فرکانسی امواج الکترومغناطیس مورد بررسی ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بود. شاخص نهایی مورد بررسی درباره کارایی محافظتی شیلد،  $|\Delta|$  بود که در شرایط ضخامت و فرکانس مختلف نمونه‌ها بررسی شد. نمونه‌های ساخته شده در سه ضخامت ۰/۰۰۲۷، ۰/۰۰۱۰، و ۰/۰۰۳۷ متر بررسی شدند.

ممکن است میرایی بیشتری را تجربه کند و به دلیل انتقال دوم از سیر به هوا، بازتاب‌های متعددی رخ دهد. بنابراین  $SE_T$  ترکیبی از همه این پدیده‌ها (انعکاس، جذب، افت انعکاسی چندگانه) است (۳۱).

فرمول (۲):

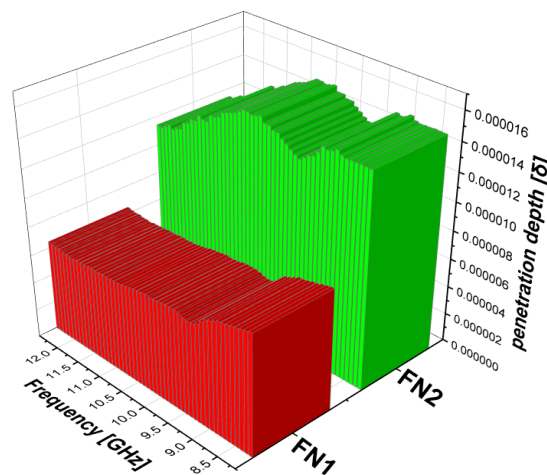
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

در فرمول‌های بالا، مقدار  $f$  نشان‌دهنده فرکانس امواج الکترومغناطیس بر حسب هرتز،  $\sigma$  نشان‌دهنده رسانایی الکتریکی،  $\mu$  مقدار نفوذپذیری مغناطیسی و  $\delta$  عمق نفوذ است.

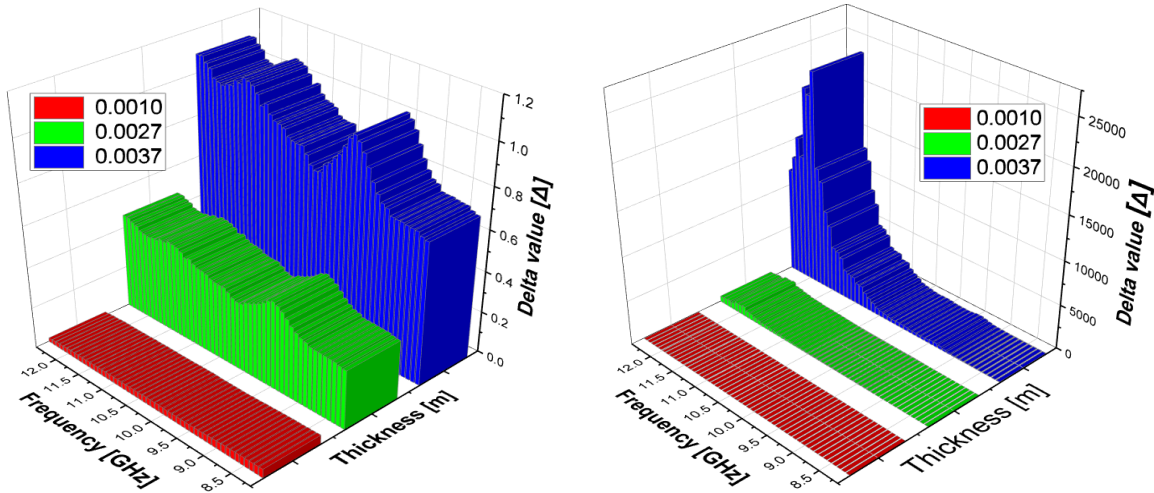
جهت بررسی کارایی شیلد الکترومغناطیسی، مطالعات از معادله دلتا استفاده می‌کنند. بر اساس این معادله،  $|\Delta|$  نشان دهنده درجه عدم تطابق بین مقاومت محیط و اجزای شیلد است. بیشترین مقدار

فرمول (۵):

در این معادلات،  $\delta_\epsilon$  و  $\delta_m$  به ترتیب نشان‌دهنده فاکتور پراکندگی دی‌الکتریکی و مغناطیسی است. مقدار  $C$  نشان دهنده سرعت نور است. متغیرهای  $\mu'$  و  $\epsilon'$  نشان دهنده تعامل بین ذرات ماده با اجزای الکتریکی و مغناطیسی میدان‌های الکترومغناطیسی است و مقدار انرژی ذخیره شده را نشان می‌دهد (۲۶). هرچقدر مقدار  $|\Delta|$  بیشتر به سمت صفر میل کند، نشان دهنده تطابق بیشتر بین مقاومت محیط و مواد شیلد است که نشان‌دهنده حداکثر قدرت جذب در شیلد است (۲۵).



شکل-۱. مقایسه مقدار عمق نفوذ در بین دو نمونه نانو کامپوزیت در فرکانس‌های مختلف



شکل-۲. مقایسه مقدار  $\Delta$  در دو نمونه نانوکامپوزیت ساخته شده در فرکانس‌های مختلف و سه ضخامت نمونه‌های نانوکامپوزیت

ساخته شد. فرکانس امواج الکترومغناطیس مورد مطالعه از ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بود.

بر اساس نتایج مطالعه حاضر، در ضخامت یکسان نمونه‌های نانو کامپوزیت مقدار  $SE_T$  تغییر می‌کند. به این صورت که در نمونه FN2 بیشترین میزان  $SE_T$  مشاهده می‌شود و به این معناست که استفاده از این ترکیب باعث کاهش ۹۹ درصدی امواج الکترومغناطیسی می‌شود. این نمونه نانو کامپوزیت شامل ۵۰ درصد ترکیب وزنی کربن و ۱۵ درصد  $Fe_3O_4$  است.

بر اساس شکل ۱، عمق نفوذ در نمونه FN2 نسبت به نمونه FN1 بیشتر است و همچنین افزایش فرکانس باعث کاهش عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس در شیلد می‌شود. نتایج مطالعه Bachir و همکاران (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که افزایش ضخامت باعث افزایش جذب می‌شود. چون عمق نفوذ افزایش می‌یابد (۳۱). ضخامت کم شیلد باعث افزایش  $SE_T$  می‌شود (۳)؛ درحالی‌که نتایج چندین مطالعه نشان می‌دهد افزایش ضخامت حفاظ باعث افزایش مقدار  $SE_T$  می‌شود (۲،۳۱).

مواد با خاصیت رسانایی الکتریکی زیاد مثل کربن، مقادیر بالای اثر حفاظتی به وسیله انعکاس و همچنین مواد با خاصیت مغناطیسی مقادیر بالای اثر حفاظتی به وسیله جذب را نشان می‌دهند (۲۴). با افزایش مقدار  $Fe_3O_4$  مقدار  $SE_A$  نیز افزایش می‌یابد. افزودن نانو ذرات  $Fe_3O_4$  به ترکیب کامپوزیت باعث افزایش خاصیت نفوذپذیری و نگهداری بیشتر و در نتیجه جذب بیشتر امواج الکترومغناطیس می‌شود (۱،۱۳). در نمونه FN1 دارا بودن ۵۰٪ وزنی آهن، مکانیسم اصلی حفاظتی شیلد جذب است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این نمونه نانوکامپوزیت با افزایش مقدار جذب، مقدار دلتا به سمت صفر کاهش یافته و نسبت به نمونه FN2، از کارایی حفاظتی بیشتری برخوردار است. نتایج مطالعه‌ای بیان می‌کند که مکانیسم جذب نسبت به انعکاس نقش بیشتری در افزایش کارایی شیلد دارد (۱۶).

علاوه بر این با افزایش مقدار کربن در ترکیب ماتریس،

شکل ۱ عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس در نمونه‌های نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، عمق نفوذ در نمونه FN2 بیشتر است. نمونه FN2 دارای ۵۰ درصد وزنی کربن است. طبق نظریه الکترومغناطیس، امواج الکترومغناطیس در فرکانس‌های بالا فقط تا ضخامت کمی از مواد رسانا نفوذ می‌کنند که به آن Skin Effect گفته می‌شود. عمق نفوذ، به عمقی از ماده محافظ اطلاق می‌شود که شدت امواج الکترومغناطیسی را به  $1/e$  مقدار اولیه آن کاهش می‌دهد (۱۴). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در فرکانس‌های بالا، در هر دو نمونه نانوکامپوزیت عمق نفوذ کاهش می‌یابد. علاوه بر این مقدار بهینه عمق نفوذ برای هر دو نمونه در محدوده فرکانس ۸-۹/۵ مشاهده می‌شود.

در شکل ۲، مقدار  $\Delta$  در هر دو نمونه داده شده است. بر اساس آنچه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود در ضخامت ۰/۰۰۱ متر نمونه‌های نانوکامپوزیت، مقدار دلتا بیشترین گرایش را به سمت صفر دارد که بنابر توضیحات می‌توان نتیجه گرفت در این ضخامت بیشترین کارایی شیلد الکترومغناطیس مشاهده می‌شود. مقدار دلتا به ضخامت شیلد و فرکانس امواج الکترومغناطیس بستگی دارد. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، افزایش فرکانس باعث افزایش مقدار  $\Delta$  در نمونه‌ها می‌شود. در فرکانس‌های اولیه، مقدار دلتا بیشترین نزدیکی را به صفر دارد. که نشان می‌دهد حداکثر مقادیر جذب در این ناحیه فرکانسی رخ می‌دهد. وابستگی کارایی شیلد به فرکانس نشان می‌دهد که در فرکانس برابر، عامل تعیین‌کننده کارایی شیلد، ضخامت آن است.

## بحث

مطالعه حاضر باهدف بررسی کارایی شیلد الکترومغناطیس در ضخامت‌ها و فرکانس‌های مختلف و با درصد ترکیب وزنی مختلف از کربن و آهن انجام شد. با استفاده از درصد‌های وزنی مختلف از ترکیب نانو ذرات کربن سیاه و  $Fe_3O_4$ ، دو نمونه نانو کامپوزیت

و شیلدهای محافظ می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش یا حذف مواجهه با امواج الکترومغناطیس شود. پلیمرها به دلیل ویژگی‌های مکانیکی منحصر به فرد خود و انعطاف پذیری بالا و الاستیسیته عالی که دارند گزینه مناسبی برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها هستند. ساخت و افزایش کارایی محافظتی شیلدهای نانو کامپوزیتی با افزودن مواد مختلف امکان پذیر است. برای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس دو ویژگی مهم مواد محافظ باید در نظر گرفته شود. رسانا بودن و خاصیت مغناطیسی. کربن و آهن موادی هستند که به ترتیب این دو ویژگی را دارند که باعث کاربرد زیاد این مواد در ساخت و تهیه نانو کامپوزیت‌های محافظ امواج الکترومغناطیس داشته باشند.

ویژگی‌های ساختاری شیلدهای نانو کامپوزیت مثل ساختار و ترکیب وزنی مواد تشکیل دهنده می‌تواند بر کارایی محافظتی شیلد اثرگذار باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد افزایش ضخامت باعث کاهش  $SE_T$  می‌شود. علاوه بر این بر اساس معادله  $\Delta$  می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تطابق و همخوانی بین مقاومت محیط و مقاومت اجزای شیلد باعث افزایش راندمان و کارایی محافظتی شیلد می‌شود.

#### نکات بالینی کاربردی برای جوامع نظامی

- صنایع نظامی با توجه به ماهیت و نوع عملکرد خود بسیار حائز اهمیت هستند. استفاده از سیستم‌های راداری و سیستم‌های کنترل از راه دور، سیستم‌های کنترل زیر دریایی، پهبادها و سیستم‌های مراقبتی، مواجهه افراد و تجهیزات با امواج الکترومغناطیس را اجتناب ناپذیر می‌سازد. لذا با توجه به نتایج مطالعه حاضر، جهت کنترل‌های فردی و محیطی مواجهه با امواج الکترومغناطیس استفاده از شیلدهای نانو کامپوزیت با کارایی و راندمان بالا به عنوان یکی از بهترین روش‌های کنترل مهندسی توصیه می‌شود.

**تشکر و قدردانی:** بدین جهت نویسندگان مقاله مراتب سپاسگزاری خود را از مرکز تحقیقات بهداشت دانشگاه علوم پزشکی بقیه‌الله (عج) به علت حمایت مالی از این طرح با کد ۹۸۰۰۰۳۹ اعلام می‌دارند. این مطالعه با کد اخلاق IR.BMSU.REC.1398.273 توسط کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه علوم پزشکی بقیه‌الله (عج) تأیید شد.

**تضاد منافع:** نویسندگان تصریح می‌کنند که هیچ گونه تضاد منافعی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

#### منابع

1. Pourtaghi G, Karrabi M, Tavakoli H, Karimi Zarchi A, Ghahri A. Comparison of the Protective Effect of Aluminum in the Laminate and Network Mode against Electromagnetic Radiation with a

رسانایی الکتریکی در نانو کامپوزیت افزایش می‌یابد (۱۹،۲۶). افزودن نانو ذرات کربن سیاه به ماتریس پارافین واکس باعث افزایش کارایی محافظتی شیلد می‌شود. نتایج یک مطالعه نشان می‌دهد افزودن تنها ۱۰ درصد وزنی کربن سیاه به ترکیب نانو کامپوزیت باعث افزایش ۲۰ دسی‌بل در  $SE_T$  می‌شود که از نظر تجاری بسیار مطلوب است (۴).

جهت بهبود کارایی محافظتی شیلد الکترومغناطیس توصیه شده است که انعکاس کاهش یافته و جذب افزایش یابد. افزایش مقدار جذب در شیلد باعث بهترین تطابق مقاومت بین محیط و اجزای شیلد می‌شود و باعث میل بیشتر دلتا به سمت صفر و در نتیجه افزایش کارایی محافظتی شیلد می‌شود (۱).

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در فرکانس برابر و در ضخامت‌های مختلف، در کمترین ضخامت مقدار  $\Delta$  بیشتر به سمت صفر میل کرده و نشان دهنده تطابق بیشتر مقاومت بین محیط و اجزای شیلد است. علاوه بر این در شکل مربوط به نمونه FN2، در فرکانس‌های اولیه، مقدار دلتا به صفر نزدیک‌تر است که با نتایج مطالعه حسین آبادی (۲۰۲۰) مطابقت دارد. بر اساس نتایج این مطالعه، بیشترین عدم تطابق یا کمترین جذب در فرکانس‌های بالا رخ می‌دهد. همچنین افزایش ضخامت شیلد بیشتر از ۳ میلی‌متر باعث کاهش کارایی شیلد می‌شود (۲۶). در شکل مربوط به نمونه FN1 مقادیر دلتا بسیار بزرگ هستند که بیشترین مقادیر عدم تطابق مقاومت در ضخامت ۰/۰۰۳۷ و در فرکانس‌های بالا مشاهده می‌شود که با نتایج مطالعه حسین آبادی همخوانی دارد.

افزایش فرکانس امواج الکترومغناطیس باعث کاهش  $SE_T$  در نمونه‌ها می‌شود. با افزایش فرکانس، توانایی نانو کامپوزیت برای نگهداری یا انعکاس امواج کاهش می‌یابد که به صورت کاهش در  $SE_T$  دیده می‌شود. حال آنکه برای بررسی دقیق‌تر اثر فرکانس بر کارایی محافظتی شیلد، زراوشانی و همکاران در مطالعه خود توصیه به تقسیم‌بندی باند فرکانسی X می‌کنند. بر این اساس که طیف فرکانسی ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز به سه گروه بخش پایین (۸/۵-۹ گیگاهرتز)، بخش میانی (۱۱-۹/۶ گیگاهرتز) و بخش بالایی (۱۲/۵-۱۱/۱ گیگاهرتز) تقسیم می‌شود (۲) و سپس مقادیر  $SE_T$  نیز بررسی می‌شوند. بر اساس این تقسیم‌بندی نیز مشاهده می‌شود که میانگین  $SE_T$  در گروه فرکانسی پایین نسبت به دو گروه دیگر نیز بیشتر است.

#### نتیجه گیری

با توجه به محدودیت‌های موجود در کاربرد روش‌های کنترلی مدیریتی و فردی، استفاده از کنترل‌های مهندسی مثل انواع حفاظ

Selective Frequency of 900 MHz. Journal of Military Medicine. 2018; 20(3):309-15.

2. Zaroushani V, Khavanin A, Mortazavi S, Jnonidi A, Moieni M, Javadzadeh M. The role of a new

- electromagnetic shielding in reducing the microwave radiation for the X-band frequencies. *Iran Occupational Health*. 2015;12(5):83-99. [In Persian]
3. Lalan V, Ganesanpotti S. Broadband Electromagnetic Response and Enhanced Microwave Absorption in Carbon Black and Magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles Reinforced Polyvinylidene fluoride Composites. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49(3):1666-76. doi:10.1007/s11664-019-07635-3
  4. Kausar A. Electromagnetic interference shielding of polyaniline/Poloxalene/carbon black composite. *International Journal of Materials and Chemistry*. 2016;6(1):6-11. doi:10.5923/j.ijmc.20160601.02
  5. Zhang D, Chen H, Hong R. Preparation and Conductive and Electromagnetic Properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PANI Nanocomposite via Reverse In Situ Polymerization. *Journal of Nanomaterials*. 2019;2019. doi:10.1155/2019/7962754
  6. Nakhaei O, Shahtahmassebi N, Roknabadi MR, Behdani M. Synthesis, UV-shielding and electromagnetic wave absorbing properties of polyvinylpyrrolidone-TiO<sub>2</sub>/polyacrylonitrile-SiO<sub>2</sub> nanofibre nanocomposites. *Bulletin of Materials Science*. 2019;42(1):42. doi:10.1007/s12034-019-1734-3
  7. IARC W. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Press Release N: 208. 2011. Available from: [https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr208\\_E.pdf](https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf)
  8. Standard RP. Maximum exposure levels to radiofrequency fields—3 KHz to 300 GHz. *Radiation Protection Series*. 2002;3. Available from: [https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps3.pdf?acsf\\_files\\_redirect](https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps3.pdf?acsf_files_redirect)
  9. Chung DD. Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;123587. doi:10.1016/j.matchemphys.2020.123587
  10. Samková A, Kulhavy P, Tunáková V, Petru M. Improving electromagnetic shielding ability of plaster-based composites by addition of carbon fibers. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018;2018. doi:10.1155/2018/3758364
  11. Singh AK, Srivastava O, Singh K. Shape and size-dependent magnetic properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles synthesized using piperidine. *Nanoscale Research Letters*. 2017;12(1):1-7. doi:10.1186/s11671-017-2039-3
  12. El Ghandoor H, Zidan H, Khalil MM, Ismail M. Synthesis and some physical properties of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles. *International Journal of Electrochemical Science*. 2012;7(6):5734-45.
  13. Chen Y, Wang Y, Zhang H-B, Li X, Gui C-X, Yu Z-Z. Enhanced electromagnetic interference shielding efficiency of polystyrene/graphene composites with magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Carbon*. 2015;82:67-76. doi:10.1016/j.carbon.2014.10.031
  14. Rao BB, Chengappa M, Kale S. Lightweight, flexible and thin Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-loaded, functionalized multi-walled carbon nanotube buckypapers for enhanced X-band electromagnetic interference shielding. *Materials Research Express*. 2017;4(4):045012. doi:10.1088/2053-1591/aa69f4
  15. Chao Z, Yu Y, Lei F, Hu D. A lightweight and flexible CNT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite with high electromagnetic interference shielding performance. *Carbon Letters*. 2021;31:93-7. doi:10.1007/s42823-020-00152-y
  16. Valipour F, Dehghan SF, Hajizadeh R. The effect of nano- and microfillers on thermal properties of Polyurethane foam. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021. doi:10.1007/s13762-021-03150-3
  17. Chen W, Wang J, Zhang B, Wu Q, Su X. Enhanced electromagnetic interference shielding properties of carbon fiber veil/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles/epoxy multiscale composites. *Materials Research Express*. 2017;4(12):126303. doi:10.1088/2053-1591/aa9af9
  18. Liu L, Bian X-M, Hou Z-L, Wang C-Y, Li ZS, Hu HD, et al. Electromagnetic response of magnetic graphene hybrid fillers and their evolutionary behaviors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2016;27(3):2760-72. doi:10.1007/s10854-015-4088-7
  19. Wang X. Investigation of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Nanostructural Carbon Black/ABS Composites. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2011;2011. doi:10.4236/jemaa.2011.35026
  20. Kuzhir PP, Paddubskaya AG, Maksimenko SA, Kaplas T, Svirko Y. Microwave absorption properties of pyrolytic carbon nanofilm. *Nanoscale Research Letters*. 2013;8(1):1-6. doi:10.1186/1556-276X-8-60
  21. Kong L, Li Z, Liu L, Huang R, Abshinova M, Yang Z, et al. Recent progress in some composite materials and structures for specific electromagnetic applications. *International Materials Reviews*. 2013;58(4):203-59. doi:10.1179/1743280412Y.0000000011
  22. Jafarian m, Omid m, Khanali m, MokhtariMotameniShirvan M. Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Material for Thermal Energy Storage Using Nanotechnology. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 2019;50(2):319-29. doi:10.22059/ijbse.2018.264959.665092
  23. Wang J, Wang J, Zhang B, Sun Y, Chen W, Wang T. Combined use of lightweight magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-coated hollow glass spheres and electrically conductive reduced graphene oxide in an epoxy matrix for microwave absorption. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016;401:209-16. doi:10.1016/j.jmmm.2015.10.001
  24. Saravanan P, TR SK, Radha R, Balasubramaniam M, Balakumar S. Enhanced shielding effectiveness in nanohybrids of graphene derivatives with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and ε-Fe<sub>3</sub>N in the X-band microwave region. *Nanoscale*. 2018;10(25):12018-34. doi:10.1039/C8NR03397H
  25. Ma Z, Zhang Y, Cao C, Yuan J, Liu Q, Wang J.



Attractive microwave absorption and the impedance match effect in zinc oxide and carbonyl iron composite. *Physica B: Condensed Matter*. 2011;406(24):4620-4. doi:10.1016/j.physb.2011.09.039

26. Hosseinabadi S, Jafari MJ, Kokabi M, Mohseni M. Improving the electromagnetic shielding of fabricated NdFeB particles by a coating thin carbonaceous layer. *Chemical Physics Letters*. 2020;739:137015. doi:10.1016/j.cplett.2019.137015

27. Massango H, Tsutaoka T, Kasagi T. Electromagnetic properties of Fe<sub>53</sub>Ni<sub>47</sub> and Fe<sub>53</sub>Ni<sub>47</sub>/Cu granular composite materials in the microwave range. *Materials Research Express*. 2016;3(9):095801. doi:10.1088/2053-1591/3/9/095801

28. Manafi P, Ghasemi I, Manafi MR, Ehsaninamin P, Asl FH. Non-isothermal crystallization kinetics assessment of poly (lactic acid)/graphene nanocomposites. *Iranian Polymer Journal*.

2017;26(5):377-89. doi:10.1007/s13726-017-0527-z

29. Furlan L, Ferreira C, Dal Castel C, Santos K, Mello A, Liberman S, et al. Effect of processing conditions on the mechanical and thermal properties of high-impact polypropylene nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(22-23):6715-8. doi:10.1016/j.msea.2011.05.044

30. Ahmad AF, Abbas Z, Obaiys SJ, Ibrahim N, Hashim M, Khaleel H. Theoretical and numerical approaches for determining the reflection and transmission coefficients of OPEFB-PCL composites at X-Band frequencies. *PloS one*. 2015;10(10):e0140505. doi:10.1371/journal.pone.0140505

31. Bachir G, Abdechafik H, Mecheri K, editors. Comparison electromagnetic shielding effectiveness between single layer and multilayer shields. 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC); 2016: IEEE. doi:10.1109/UPEC.2016.8114106