Review Article

Polymerization
Quarterly, 2024
Volume 14, Number 2
Pages 49-62
ISSN: 2252-0449

An Overview of Polymeric Materials as Electromagnetic Interference Shielding

Mohammad Amin Zare and Mohsen Mohammadi*

Department of Polymer Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Qom University of Technology, P.O. Box 37195-1519, Qom, Iran

Received: 12 August 2023, Accepted: 8 November 2023

Abstract

Today, people are exposed to radiation in their living and working environment. Electronic equipment and devices are widely used in various fields with the development of electronic science and technology. An excessive use of electronic devices leads to unwanted and undesirable byproduct, which is a novel kind of pollution called electromagnetic interference (EMI). Although traditional metals and their alloys can serve as good electromagnetic shielding materials, their heavy weight, high cost as well as poor corrosion resistance limit their application in this field. Therefore, lightweight electromagnetic shielding materials are gradually attracting more and more attention to meet the trend of lightweight and highly integrated electronic equipment. Polymer material and their composites have been used as EMI shielding materials due to their characteristics like lightweight, good corrosion resistance, and superior electrical, thermal, mechanical and magnetic properties. These lightweight materials with good EMI shielding performance will find more potential applications in communications, electronics, aerospace, military, etc. In this article, the phenomenon of electromagnetic interference and the types of polymer composite shieldings and their shieldings effectiveness have been reviewed.

Key Words

electromagnetic wave, electromagnetic interference shielding, lightweight materials, shielding effectiveness, polymer matrix composite

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mohammadi@qut.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال چهاردهم، شماره ۲،
صفحه ۶۲-۴۹، ۱۴۰۳
ISSN: 2252-0449

مروری کلی بر مواد پلیمری به‌عنوان حفاظ تداخل الکترومغناطیسی

محمدامین زارع، محسن محمدی*

قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۵۱۹-۳۷۱۹۵

دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۷

چکیده

امروزه مردم در محیط زندگی و کار خود درمعرض تابش قرار می‌گیرند. تجهیزات و وسایل الکترونیکی با توسعه علم و فناوری الکترونیک به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شوند. به‌کارگیری بیش از حد وسایل الکترونیکی به مسائل جانبی ناخواسته و نامطلوب منجر می‌شود که نوعی آلودگی جدید به نام تداخل الکترومغناطیسی را ایجاد می‌کند. اگرچه فلزات سنتی و آلیاژهای آن‌ها می‌توانند به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی به‌خوبی عمل کنند، اما وزن سنگین، هزینه‌بری زیاد و همچنین مقاومت ضعیف دربرابر خوردگی کاربرد آن‌ها را در این زمینه محدود می‌کند. بنابراین، به‌تدریج توجه بیشتری به مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی سبک‌وزن معطوف شده تا با روند تجهیزات الکترونیکی سبک‌وزن و بسیار یک‌پارچه مواجه شوند. مواد پلیمری و کامپوزیت‌های آن‌ها به‌دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن سبک، مقاومت دربرابر خوردگی خوب، خواص برتر الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و مغناطیسی به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی استفاده شده‌اند. این مواد سبک‌وزن با عملکرد حفاظتی خوب، تداخل الکترومغناطیسی کاربردهای بالقوه بیشتری در ارتباطات، الکترونیک، هوافضا، نظامی و غیره پیدا خواهند کرد. در این مقاله پدیده تداخل الکترومغناطیسی و انواع حفاظ‌های کامپوزیتی پلیمری و میزان اثربخشی این حفاظ‌ها مرور شده‌اند.

محمدامین زارع

محسن محمدی

واژگان کلیدی

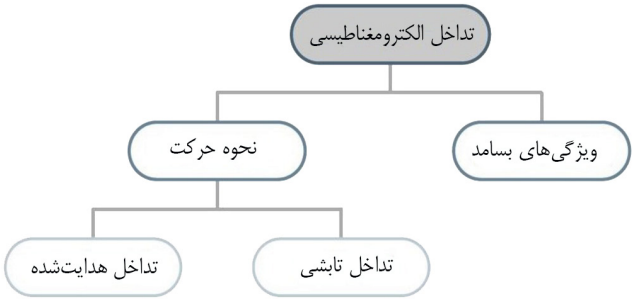
موج الکترومغناطیسی،
حفاظ تداخل الکترومغناطیسی،
مواد سبک‌وزن،
اثربخشی حفاظ،
کامپوزیت ماتریس پلیمری

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
mohammadi@qut.ac.ir

مقدمه

تابش‌های الکترومغناطیسی، به‌ویژه نوع پربسامد آن‌ها مانند امواج رادیویی ساطع‌شده از تلفن‌های همراه، تمایل دارند با ابزارهای الکترونیکی (مانند رایانه‌ها) تداخل داشته باشند. تداخل متقابل بین دستگاه‌هایی مانند تلویزیون، رایانه، تلفن همراه و رادیو می‌تواند کارایی دستگاه‌ها را کاهش دهد. شایع‌ترین علت تداخل الکترومغناطیسی (electromagnetic interference)، تخلیه الکتروستاتیک است. این یک پدیده رایج است، مانند دریافت نوفه‌های ناهنجار تلویزیون به‌شکل درخشش روی صفحه و کلیک شنیده‌شده در سامانه‌های صوتی هنگام تداخل سیگنال‌ها که حتی فرد غیرفنی به‌راحتی آن را تشخیص می‌دهد. تداخل الکترومغناطیسی در صورت عدم مراقبت می‌تواند باعث اختلال در عملکرد ابزارهای الکترونیکی شود. همچنین، می‌تواند بر سلامت انسان اثر منفی بگذارد.

قرارگیری در معرض پرتوهای الکترومغناطیسی، خطر ابتلا به سرطان، آسم، بیماری‌های قلبی، میگرن و حتی سقط جنین را افزایش می‌دهد. حفاظ تداخل الکترومغناطیسی، تابش‌های الکترومغناطیسی را بازتاب یا جذب می‌کند. این ماده به‌عنوان حفاظ عمل می‌کند و در تابش‌های پربسامد، مانند امواج رادیویی، اجازه نفوذ را نمی‌دهد. مانع ساخته‌شده از ماده رسانا یا مغناطیسی که تابش‌های الکترومغناطیسی را سد می‌کند، حفاظ تداخل الکترومغناطیسی نامیده می‌شود [۱]. این حفاظ در کاربردهای نظامی و غیرنظامی از اهمیت زیادی برخوردار است. بازده حفاظ ۳۰ dB تا ۶۰ dB می‌تواند الزامات تجهیزات الکترونیکی صنعتی عمومی را برآورده کند. در حالی که حفاظ ۶۰ dB تا ۹۰ dB می‌تواند نیازهای ابزار دقیق و تجهیزات نظامی را برآورده کند. به‌طور کلی، آلودگی الکترومغناطیسی می‌تواند با انرژی امواج الکترومغناطیسی در هر باند بسامدی ایجاد شود. تداخل بسامد رادیویی شکل خاصی از تداخل الکترومغناطیسی است، در حالی که ریزموج، نور، گرما، تابش ایکس و پرتوهای کیهانی سایر انواع خاص انرژی الکترومغناطیسی هستند. سایر تداخلات الکترومغناطیسی رایج عبارت از پالس‌های الکترومغناطیسی با باند پهن، انفجار انرژی الکترومغناطیسی مانند صاعقه یا انفجار هسته‌ای در مدت زمان کوتاه، تخلیه الکتروستاتیک ناشی از اصطکاک الکتروستاتیک و غیره است [۲]. به‌طور کلی، حفاظ الکترومغناطیسی عمدتاً برای میدان‌های الکترومغناطیسی متناوب با بسامدهای بیش از ۱۰ kHz است. تداخل الکترومغناطیسی را می‌توان به دو صورت طبقه‌بندی کرد: نحوه حرکت و ویژگی‌های بسامدی آن. نحوه حرکت آن نیز



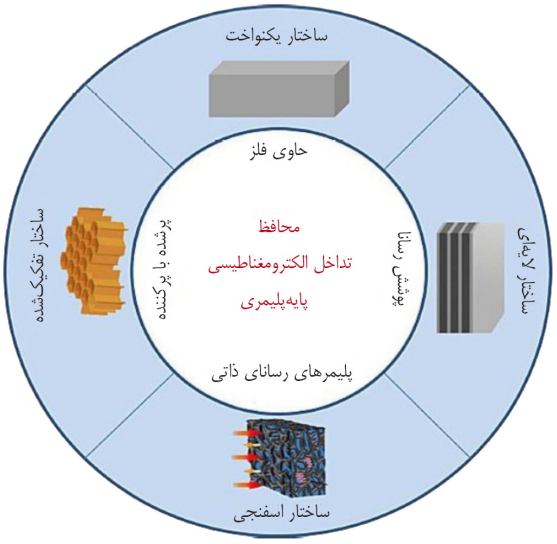
شکل ۱- حالت‌های تداخل الکترومغناطیسی.

به دو دسته تداخل تابشی و هدایت‌شده تقسیم می‌شود (شکل ۱).

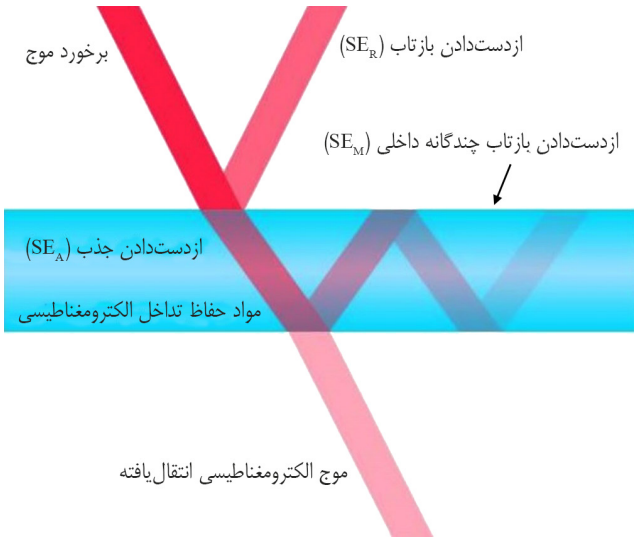
تداخل تابشی، انرژی الکترومغناطیسی است که از یک دستگاه، کابل یا سیم‌کشی متصل به‌هم ساطع می‌شود. در حالی که در تداخل هدایت‌شده، انرژی الکترومغناطیسی از طریق اتصال خارجی از دستگاه عبور می‌کند. تداخل الکترومغناطیسی را می‌توان براساس بسامد به‌عنوان باند باریک و پهن، ۱ GHz تا ۸ GHz مشخص کرد. تداخل باند پهن در یک محدوده بسامد گسترده وجود دارد. محدوده بسامدهای مختلف، کاربردهای متفاوتی دارند. باند L به‌وسیله ماهواره‌های مدار زمین و ارتباطات بی‌سیم و باند S در برنامه‌های چندرسانه‌ای مانند تلفن‌های همراه و تلویزیون استفاده می‌شود. باند C برای دستگاه‌های مخابراتی، رادیویی و وای‌فای از راه دور و باند X (۸ GHz تا ۱۲ GHz) برای نظارت بر آب‌وهوا و کنترل ترافیک هوایی به‌کار می‌رود. باند Ku (۱۲ GHz تا ۱۸ GHz) برای سامانه‌هایی با دیافراگم بسیار کوچک، ارتباطات ماهواره‌ای و غیره استفاده می‌شود. نیاز به حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برای باندهای بسامد مختلف متفاوت است، بنابراین مواد استفاده‌شده باید براساس آن باشد. اهمیت حفاظ تداخل الکترومغناطیسی به تقاضای زیاد جامعه امروزی درباره قابلیت اطمینان وسایل الکترونیکی و رشد سریع منبع تابش بسامد رادیویی مربوط می‌شود (شکل ۲) [۱].

سازوکار حفاظت تداخل الکترومغناطیسی و اثربخشی حفاظ (SE)

در یک میدان الکترومغناطیسی متناوب، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همیشه در یک فضا و در یک زمان وجود دارند. تداخل الکترومغناطیسی با بسامد کم عمدتاً در ناحیه میدان نزدیک آشکار می‌شوند [۲] و نظریه حفاظ میدان نزدیک مبتنی بر دوقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی قابل اجراست. با افزایش بسامد موج الکترومغناطیسی، قابلیت تابش الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد و تداخل الکترومغناطیسی به ناحیه میدان‌های دور تمایل دارد که برای نظریه حفاظ امواج الکترومغناطیسی صفحه پایه مناسب هستند. اثربخشی حفاظ، مهم‌ترین پارامتر برای ارزیابی عملکرد



شکل ۲- حفاظ‌های تداخل الکترومغناطیسی پایه‌پلیمری [۲].



شکل ۳- سازوکار حفاظت تداخل الکترومغناطیسی.

حفاظ تداخل الکترومغناطیسی است. بنابراین، درک سازوکار حفاظت الکترومغناطیسی و توصیف کمی اثر حفاظت مواد حفاظ ضروری است [۲،۳].

سازوکار حفاظ تداخل الکترومغناطیسی

روش‌های زیادی برای توصیف سازوکار حفاظ تداخل الکترومغناطیسی وجود دارد، مانند اثر جریان گردابی، نظریه میدان الکترومغناطیسی و نظریه خط انتقال. در حال حاضر از میان این روش‌ها، نظریه خطوط انتقال به‌دلیل محاسبه آسان، دقت زیاد و درک آسان، محبوب‌ترین روش شده است [۶-۴]. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، نظریه حفاظ خط انتقال، حفاظ امواج الکترومغناطیسی را به‌عنوان نوعی خط انتقال درنظر می‌گیرد [۵،۷]. هنگامی که موج الکترومغناطیسی از مواد حفاظ عبور می‌کند، بخشی از آن روی سطح بیرونی (SER) بازتاب می‌شود، در حالی که قسمت باقی‌مانده برای ادامه انتقال به ماده حفاظ نفوذ می‌کند.

موج الکترومغناطیسی به‌طور مداوم به‌وسیله مواد حفاظ در طول انتقال ضعیف می‌شود و به‌طور مکرر در دو سطح مشترک از مواد حفاظ (SEA) بازتاب و منتقل می‌شود. بنابراین، سازوکار حفاظت مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برای امواج الکترومغناطیسی شامل بازتاب در سطح مواد حفاظ و جذب آن‌ها و بازتاب‌های داخلی متعدد درون مواد حفاظ است. به عبارت دیگر می‌توان گفت، حفاظت تداخل الکترومغناطیسی شامل سه سازوکار اصلی بازتاب، جذب و بازتاب چندگانه است. به‌عنوان مثال، برای ورقه‌ای از مواد رسانای همگن (بدون ترکیبی از پرکننده رسانا و ماتریس عایق) بازتاب، سازوکار حفاظت اولیه است. برای حفاظت از بازتاب، مواد باید دارای حامل‌های بار متحرک (الکترون‌ها یا سوراخ‌ها) باشند تا با امواج الکترومغناطیسی ورودی تعامل داشته باشند [۸،۹].

جذب دومین سازوکار مهم است و به ضخامت حفاظ بستگی دارد. هنگامی که ماده حفاظ دارای دوقطبی‌های الکتریکی یا مغناطیسی باشد با امواج الکترومغناطیسی برهم‌کنش یافته و حفاظت از طریق جذب افزایش می‌یابد. همچنین در مواد رسانا، جذب می‌تواند از اتلاف مقاومتی ناشی شود که شامل تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به گرما به‌وسیله اثر ژول است. سومین سازوکار حفاظت، بازتاب چندگانه است. به‌طور معمول، اگر حفاظ نازک‌تر از عمق پوسته باشد، بازتاب چندگانه حفاظت کلی را کاهش می‌دهد و اگر حفاظ ضخیم‌تر از عمق پوسته باشد، می‌توان آن را نادیده گرفت. در کامپوزیت‌های پلیمری، سازوکارهای حفاظت پیچیده‌تر از سازوکارهای مربوط به مواد رسانای همگن است، زیرا سطح وسیعی برای بازتاب و بازتاب چندگانه وجود دارد. اولین بازتاب یک موج الکترومغناطیسی از سطح ماده رسانا باید از سازوکار بازتاب چندگانه متمایز شود که بازتاب مجدد امواج بازتابی قبلی است [۸]. به‌طور کلی می‌توان دریافت، به‌محض برخورد موج الکترومغناطیسی به ماده حفاظ، بخشی از آن در سطح جلویی حفاظ بازتاب می‌شود. بخشی از موج در مواد حفاظ جذب و بخش کوچکی هم از سطح پشتی بازتاب می‌شود و بازتاب‌های داخلی متعددی را ایجاد می‌کند.

اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی

به‌منظور توصیف کمی اثر حفاظت مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی، اثربخشی حفاظ معمولاً برای نشان‌دادن قابلیت

حفاظ و تأثیر مواد حفاظ روی امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. تعاریف متعددی از اثربخشی حفاظ وجود دارد [۵،۱۰]:

۱- نسبت قدرت میدان الکتریکی در یک مکان خاص بدون مواد حفاظ (E_0) به شدت میدان الکتریکی در همان مکان در مجاورت مواد حفاظ (E_S)، یعنی:

$$SE_E=20\log\frac{|E_0|}{|E_S|} \quad (۱)$$

۲- نسبت قدرت میدان مغناطیسی در یک مکان خاص بدون مواد حفاظ (H_0) به شدت میدان مغناطیسی در همان مکان در مجاورت مواد حفاظ (H_S) یعنی:

$$SE_H=20\log\frac{|H_0|}{|H_S|} \quad (۲)$$

۳- نسبت چگالی توان در یک مکان خاص بدون مواد حفاظ (P_0) به چگالی توان در همان مکان در مجاورت مواد حفاظ (P_S)، یعنی:

$$SE_H=10\log\frac{|P_0|}{|P_S|} \quad (۳)$$

امروزه فرمول Schelkunoff، براساس مدل خط انتقال به‌طور گسترده برای محاسبه اثر حفاظتی مواد حفاظ یکنواخت استفاده می‌شود. شکل خاص این معادله به شکل:

$$SE=SE_A+SE_R+SE_M \quad (٤)$$

که در آن، SE_A اتلاف جذبی مواد حفاظ است، SE_R اتلاف بازتابشی منفرد مواد حفاظ و SE_M ازدست دادن بازتاب‌های داخلی متعدد درون مواد حفاظ است.

$$SE_A=131/43t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (۵)$$

$$\sqrt{SE_M=10\log\left[1-2\times10^{-0/1SE_A}\cos\left(0/23SE_A\right)+10^{-0/2SE_A}\right]} \quad (٦)$$

که در آن، f بسامد موج الکترومغناطیسی، t چگالی ماده حفاظ، r فاصله از منبع میدان تا ماده حفاظ، μ_R نفوذپذیری نسبی ماده حفاظ و σ_R رسانندگی نسبی (نسبت به مس) است. رسانندگی و نفوذپذیری مغناطیسی مواد رایج در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- رسانندگی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مواد رایج نسبت به مس [۲].

مواد	رسانندگی الکتریکی	نفوذپذیری مغناطیسی
Cu	۱	۱
Fe	۰/۱۷	۵۰-۱۰۰۰
Ag	۱/۰۵	۱
Au	۰/۷	۵۰-۱۰۰۰
Al	۰/۱	۱
Ni	۰/۲	۱
گرافن	۰/۱	۱/۰۱
الیاف کربن	$۲/۷۵\times۱۰^{-۲}$	۰/۹۷
نانولوله کربن	۰/۱	۱/۰۱
گرافیت	$۱/۸۳\times۱۰^{-۲}$	۰/۹۹

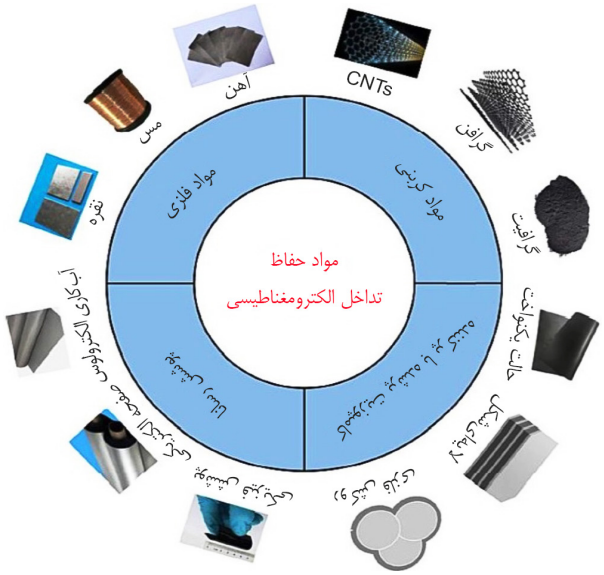
طبق فرمول، بهبود رسانندگی مواد حفاظ می‌تواند SE_A و SE_R را به‌طور هم زمان بهبود بخشد که به بهبود عملکرد حفاظ الکترومغناطیسی مواد منجر می‌شود. افزون بر این، افزایش نفوذپذیری مواد حفاظ موجب افزایش SE_A و کاهش SE_R می‌شود. بنابراین، بهبود رسانندگی الکتریکی مواد حفاظ و ایجاد اتلاف مغناطیسی برای بهبود اثربخشی آن‌ها مفید است. فرمول محاسبه اثربخشی حفاظ الکترومغناطیسی که در مقدمه گفته شد، نوعی روش محاسبه غیرمستقیم است که عمدتاً براساس پارامترهای فیزیکی مواد است. بااین‌حال، بیشتر مواد کامپوزیتی چندمنظوره ساختارهای پیچیده‌ای دارند که برآوردن پیش‌نیازهای کاربرد فرمول در روش‌های محاسبه غیرمستقیم و محاسبات نظری دقیق را معمولاً دشوار می‌سازد. بنابراین، روش آزمون مستقیم آسان‌تر، سریع‌تر و کاربردی‌تر است. روش آزمون مستقیم عمدتاً به اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل پارامترهای مشخصه به‌کمک یک تحلیلگر شبکه برداری بستگی دارد.

به‌طور کلی، پارامترهای S (ضریب بازتاب S ۱۱ و ضریب انتقال S ۲۲) با تحلیلگر شبکه برداری اندازه‌گیری و اثربخشی حفاظ با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$R=|S11|^2 \quad (۷)$$

$$T=|S21|^2 \quad (۸)$$

$$A+R+T=1 \quad (۹)$$



شکل ٤- طبقه‌بندی مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی [۲].

$$SE=-10\log T \qquad (۱۰)$$

$$SE_R=-10\log(1-R) \qquad (۱۱)$$

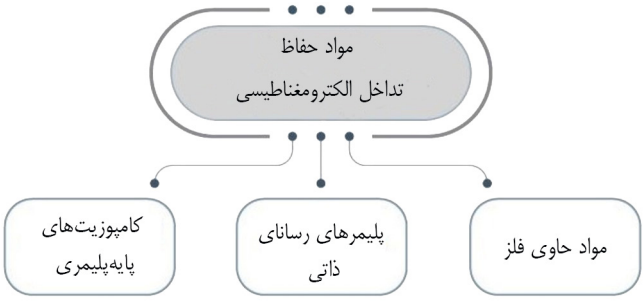
$$SE_A=-10\log\left(\frac{T}{1-R}\right)=SE-SE_R-SE_M \qquad (۱۲)$$

که در آن، R بازتاب، T انتقال، A جذب و SE_M زمان ناچیزی است که SE_A>۱۵ dB باشد. اثربخشی حفاظ الکترومغناطیسی، ارتباط نزدیکی با پارامترهای عملکرد مواد آن مانند رسانندگی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی دارد. همان‌طور که در شکل ٤ نشان داده شده است، مواد حفاظ الکترومغناطیسی فعلی به‌طور عمده شامل چهار دسته اصلی فلزی، کربنی، کامپوزیت‌های پرشده و پوشش رسانا هستند. با توسعه قطعات الکترونیکی به سمت کوچک‌سازی، سبک‌وزنی، دیجیتالی‌شدن و ادغام پرتراکم، الزامات مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی افزایش یافته است. مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برپایه پلیمر، به‌دلیل مزایای هزینه‌بری و چگالی کم، مقاومت دربرابر خوردگی و فرایندپذیری آسان، توجه بیشتری را جلب کرده‌اند.

دسته‌بندی مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی

مواد برپایه پلیمر

مؤثرترین راه‌حل برای ازبین‌بردن خطر امواج الکترومغناطیسی، تهیه مواد حفاظ کارآمد است. این مواد عمدتاً برای حفاظت از منابع انتشار امواج الکترومغناطیسی یا جسمی که باید ازطریق مواد رسانا



شکل ٥- دسته‌بندی مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی.

محافظت شود، به‌منظور مسدودکردن یا تضعیف انرژی این امواج استفاده می‌شود. براساس نظریه هدایت رابط امواج الکترومغناطیسی Schelkunoff، افزایش افت بازتاب و افت جذب مواد حفاظ الکترومغناطیسی راه مؤثری برای دستیابی به حفاظت کارآمد است. مواد حفاظ سنتی، معمولاً فلزات و کامپوزیت‌های آن‌ها هستند که به‌دلیل ازدست‌دادن بازتاب زیاد فلزات است [۲،۱۱]. افزون بر این، مواد رسانای برپایه پلیمر مواد حفاظ الکترومغناطیسی قوی هستند که به انواع ذاتی و کامپوزیتی دسته‌بندی می‌شوند [۲،۱۲]. بنابراین، مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی به‌طور عمده به سه دسته تقسیم می‌شوند: مواد حفاظ الکترومغناطیسی حاوی فلز، پلیمری رسانای ذاتی و مبتنی بر پایه کامپوزیت‌های پایه‌پلیمری (شکل ٥).

مواد حاوی فلز

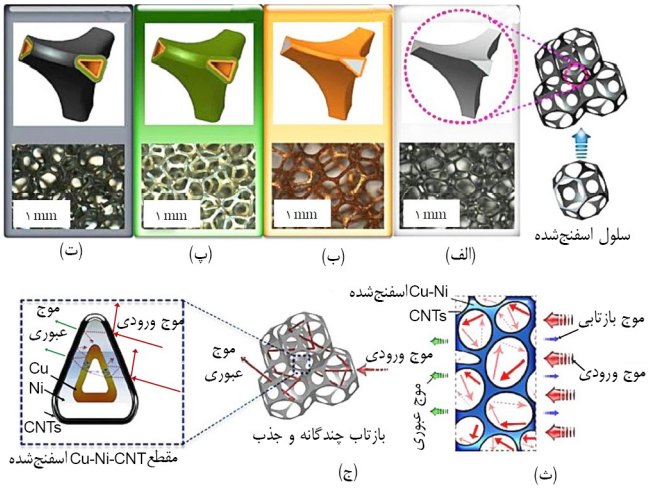
رسانندگی الکتریکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین عملکرد حفاظ الکترومغناطیسی مواد است. مواد فلزی با رسانندگی الکتریکی خوب، مانند مس و آلومینیم، معمولاً رسانندگی در حدود ١٦ S/cm تا ١٧ S/cm دارند که اولین مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی هستند [۲،۱۳،۱٤]. باتوجه‌به‌اصل حفاظ الکترومغناطیسی، ازدست‌دادن جذب و کاهش بازتاب مواد حفاظ الکترومغناطیسی با افزایش رسانندگی در طول فرایند حفاظت افزایش می‌یابد. بنابراین، فلزات و آلیاژهای آن‌ها خواص حفاظ الکترومغناطیسی بسیار خوبی را نشان می‌دهند [۲]. آماده‌سازی و عملکرد حفاظت مواد حفاظ الکترومغناطیسی حاوی فلز، مانند ورق‌های فلزی، کامپوزیت‌های فلزی، اسفنج‌های فلزی و مواد بی‌شکل فلزی به‌تفصیل بررسی شده است.

مواد متداول حفاظ ورق فلزی، شامل مواد رسانای خوب و فرومغناطیسی هستند. مواد حفاظ رسانای خوب معمولاً برای حفاظت از میدان‌های الکتروستاتیک و الکترومغناطیسی پربسامد (بسامد کم) به‌دلیل رسانندگی الکتریکی زیاد مانند مس، آلومینیم و نیکل استفاده می‌شوند. مواد حفاظ فرومغناطیسی به‌دلیل نفوذپذیری

مغناطیسی زیاد مانند آهن و فولاد سیلیکونی، معمولاً برای حفاظت میدان‌های مغناطیسی با بسامد کم (f <۱۰۰ kHz) استفاده می‌شوند. بااین‌حال، مواد فرومغناطیسی برای حفاظت از میدان‌های الکترومغناطیسی پربسامد به‌دلیل رسانندگی کم مناسب نیستند [۲]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی در تهیه آلیاژها براساس ماده اصلی برای تنظیم و بهینه‌سازی ترکیب مواد، با هدف بهبود بیشتر عملکرد حفاظ الکترومغناطیسی مواد متمرکز شده است [۲]. مواد کامپوزیتی حاوی فلز معمولاً برپایه فلزات یا آلیاژها هستند و به پلیمرها، تاربلور، الیاف و سایر تقویت‌کننده‌ها نفوذ می‌کنند [۲،۱۵]. این نه‌تنها می‌تواند بر کاستی‌های وزن سنگین مواد فلزی سنتی غلبه کند، بلکه عملکرد حفاظت الکترومغناطیسی خاصی دارد. ورود خاکستر بادی به آلیاژ آلومینیم، چگالی مواد حفاظ را تا حدود ۱۵٪ کاهش می‌دهد و اثربخشی حفاظ الکترومغناطیسی از ۴۰ dB به ۱۰۰ dB افزایش می‌یابد. نفوذ چاشنی مخلوط (seasonings)، وزن مواد پایه را کاهش می‌دهد و اثر حفاظتی را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. نفوذ پرکننده، وزن زیرلایه را کاهش می‌دهد و به‌طور هم‌زمان اثر حفاظ را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد [۱۶].

اسفنج‌های فلزی نوعی ماده با ساختار شبکه سه‌بعدی متشکل از اسکلت‌های فلزی رسانای متقابل و منافذ داخلی بوده که در سال‌های اخیر توسعه یافته است. اسفنج‌های فلزی نه تنها رسانندگی الکتریکی خوب یا خواص مغناطیسی مواد فلزی را نشان می‌دهند، بلکه ساختار متخلخلی نیز دارند که به امواج الکترومغناطیسی اجازه می‌دهند تا درون منافذ بازتاب متعددی داشته باشند. بنابراین، در مقایسه با مش‌های فلزی دوبعدی، قابلیت حفاظت از امواج الکترومغناطیسی بیشتری دارند [۲،۱۷]. اسفنج‌های فلزی به‌دلیل وزن سبک، استحکام ویژه زیاد و خاصیت حفاظ الکترومغناطیسی خوب در ساخت قطعات ساختاری اتلاف گرمایی برای ابزار دقیق استفاده می‌شوند.

عملکرد حفاظ الکترومغناطیسی اسفنج‌های تیتانیم سلولی با تخلخل ۸۶٪ تا ۹۰٪ بررسی شده است. نتایج، نشانگر اثربخشی مشهود با عملکرد خوب در بسامدهای کم است [۱۸]. اسفنج‌های تیتانیم، حفاظت الکترومغناطیسی را عمدتاً با ازدست‌دادن بازتاب در محدوده بسامد کم انجام می‌دهند و اولویت را به کاهش جذب در بسامدهای زیاد می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۹]، مواد حفاظ الکترومغناطیسی چندلایه سبک‌وزن با آبکاری مس با اندودکاری (electroless) روی اسفنج پلی‌یورتان سلول‌باز و سپس آبکاری نیکل و درنهایت رسوب الکتروکوچی نانولوله‌های کربنی تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش چگالی و ضخامت



شکل ۶- (الف) تا (ت) سنتز مس-نیکل اسفنجی‌شده و ترکیب با نانولوله‌های کربن، (ث) نمایی از انتقال ریزموج در کامپوزیت مس-نیکل-CNT اسفنجی‌شده و (ج) آثار پیکره متصل سه‌بعدی و ساختارهای چندلایه بر تداخل الکترومغناطیسی [۱۹].

منافذ، اثر حفاظتی کامپوزیت افزایش می‌یابد. بازتاب‌ها و جذب‌های متعدد، فرار ریزموج‌ها از کامپوزیت را پیش از جذب دشوار کرده و درنتیجه کامپوزیت را به ماده حفاظ بالقوه تبدیل می‌کند.

آلیاژهای بی‌شکل به‌دلیل استحکام زیاد، مقاومت دربرابر خوردگی خوب و همچنین خاصیت حفاظت مغناطیسی عالی، یکی از انواع جدید مواد حفاظ الکترومغناطیسی محسوب می‌شوند. در سال‌های اخیر، پیشرفت درخور توجهی در کاربرد آلیاژهای بی‌شکل در دستگاه‌های مغناطیسی مانند مبدل‌ها، منابع تغذیه سوئیچینگ و ابزار اندازه‌گیری دقیق انجام شده است. دلیل بهتربودن عملکرد حفاظت آلیاژ بی‌شکل از مواد سنتی این است که از اصل کنارگذر مغناطیسی برای رسانندگی جریان انرژی الکترومغناطیسی تولیدشده به‌وسیله منبع میدان استفاده می‌کند تا وارد منطقه حفاظتی نشود. سامانه‌های آلیاژی که اغلب در حفاظ الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند، عمدتاً برپایه آهن، آهن-نیکل و کبالت هستند [۲،۲۰].

مواد پلیمری رسانای ذاتی

مواد پلیمری رسانای ذاتی معمولی عبارتند از پلی‌استیلن (PA)، پلی‌پیرول (PPy)، پلی‌آنیلین (PANI)، پلی‌تیوفن (PTh) و غیره هستند. مواد پلیمری رسانای ذاتی معمولاً هنگام استفاده به‌عنوان مواد حفاظ الکترومغناطیسی، کاهش جذب زیادی دارند. بنابراین، می‌توان به‌کمک آن‌ها از آسیب تابش ثانویه به محیط اطراف ناشی از امواج الکترومغناطیسی بازتابی از مواد حفاظ در سناریوهای خاص

مانند مدارهای الکترونیکی دقیق، جلوگیری کرد. اولین ماده پلیمری رسانای ذاتی کشف‌شده، پلی‌استیلن است. پلی‌استیلن رسانندگی الکتریکی زیاد نزدیک به مس دارد، اما خواص مکانیکی ضعیف و پایداری محیطی آن، بسیاری از کاربردها را محدود می‌کند [۲]. پلی‌پیرول، پلی‌آنیلین و پلی‌تیوفن با پایداری محیطی خوب، رسانندگی 10^{-8} S/cm تا 10^{2} S/cm را در دمای محیط حفظ می‌کنند. آن‌ها سه ماده اصلی مواد پلیمری رسانای ذاتی هستند.

در میان پلیمرهای رسانا، پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین بیشتر برای اهداف حفاظتی استفاده می‌شوند. هر دو پلیمر دارای خواص شیمیایی و الکتریکی خوب، رسانندگی زیاد و پایداری محیطی خوب هستند. در میان مواد، پلی‌پیرول پوشش‌یافته روی پارچه PET و فیلم کامپوزیت پلی‌آنیلین-پلی‌یورتان (PANI-PU) اثربخشی حفاظ خوبی را نشان داده است، اما کامپوزیت‌های برپایه پلیمرهای رسانا خواص مکانیکی و فرایندپذیری ضعیفی دارند [۲].

مواد کامپوزیتی پایه‌پلیمری

اخیراً از کامپوزیت‌های برپایه پرکننده رسانا-پلیمری به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد آن‌ها استفاده شده است. از مزایای استفاده از این مواد می‌توان به وزن سبک، طراحی و فرایندپذیری آسان، هزینه کم، مقاومت دربرابر خوردگی خوب، خواص الکتریکی و مغناطیسی عالی اشاره کرد. در این بررسی، کامپوزیت‌های پلیمری با نانوپرکننده‌های برپایه فلز و کربن به‌تفصیل بحث می‌شوند. الزامات عملکرد اضافی شامل خواص مکانیکی و گرمایی قابل‌تنظیم، عملکرد مناسب، بسامد جذب قابل‌تنظیم و پهنای باند جذب گسترده است [۵،۲۱]. خوشبختانه، مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برپایه پلیمر با قابلیت فرایندپذیری خوب به‌طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا آن‌ها خواص مورد نیاز مزبور را با هزینه‌های نسبتاً کم نشان می‌دهند [۱]. افزون بر این، نانوپرکننده‌های رسانا در مواد حفاظ الکترومغناطیسی برپایه پلیمر، توسعه کامپوزیت‌های پلیمر رسانا را با قابلیت‌های اضافی ممکن می‌سازند [۲۱،۲۲].

پلیمرهای رسانا مانند پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین، به‌عنوان پوشش روی منسوجات برای محافظت از تداخل الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند. بااین‌حال، اثربخشی حفاظ الکترمغناطیسی این مواد به‌دلیل رسانندگی الکتریکی کم و گذردهی منسوجات عایق نسبتا کم است. برای رفع این موضوع، اغلب نانوپرکننده‌های کربنی با رسانندگی الکتریکی زیاد در پلیمرهای رسانا گنجانده می‌شوند تا نانوکامپوزیت‌های سبک‌وزن با عملکرد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی مدنظر را تشکیل دهند [۲۳]. پلیمرهای نارسانا مانند رزین اپوکسی (EP)، پلی‌استیرن (PS) و پلی(وینیلیدن فلوئورید) (PVDF) نیز به‌عنوان ماتریس کامپوزیت‌های پلیمری رسانا برای محافظت تداخل الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند. اغلب به‌دلیل کم‌بودن ذاتی EMI (SE < 1dB)، تعداد زیادی پرکننده رسانا برای بهبود اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی در کامپوزیت‌های پلیمری رسانای نهایی مورد نیاز است [۵،۲۳]. در مقایسه با مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی فلزی، ماتریس کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی تقریباً در تمام بخش‌های تجاری برای محافظت از تداخل الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند [۸]. باید توجه داشت، رسانندگی الکتریکی حجمی و اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی کامپوزیت‌های پلیمری رسانا در کاربردهای عملی آن‌ها باید به‌ترتیب حداقل ۱ S/cm و ۲۰ dB باشد. مقدار زیادی پرکننده اغلب برای کامپوزیت‌های پلیمری رسانا مورد نیاز است تا به اثربخشی حفاظ ایده‌آل و رسانندگی الکتریکی زیاد دست یابند، زیرا بیشتر ماتریس‌های پلیمری عایق الکتریکی هستند و به‌طور درخور توجهی مانع تشکیل شبکه رسانا به‌وسیله پرکننده‌ها می‌شوند [۵]. بااین‌حال، افزودن پرکننده به مقدار زیاد به‌ناچار انعطاف‌پذیری، فرایندپذیری و امکان اقتصادی‌بودن کامپوزیت‌ها پلیمر رسانا را محدود می‌کند [۱۶]. افزون بر این، افزایش تراکم نیز کاربرد آن‌ها را در زمینه‌هایی چون الکترونیک و ارتباطات محدود می‌کند. باوجوداین، توسعه کامپوزیت‌های پلیمری رسانای سبک‌وزن کارآمد برای حفاظ تداخل الکترومغناطیسی همیشه جذاب بوده است [۵].

کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های فلزی

شکل‌شناسی‌های مختلف پرکننده‌های فلزی مانند الیاف یا نانوذرات برای افزایش تماس با تابش الکترومغناطیسی فرودی در ماتریس پلیمری پراکنده می‌شوند. پرکننده‌های فلزی مانند الیاف فولادی زنگ‌نزن با پلی‌کربنات، آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن، نایلون ۶،۶ و ماتریس پلی‌فنیلن اکسید، جذب حفاظ تداخل الکترومغناطیسی را افزایش می‌دهند. سایر پرکننده‌ها مانند الیاف آلومینیم، برنج و مس نیز به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی استفاده شده‌اند. پرکننده‌ها به‌شکل پولک و پودر نیز به‌کار می‌روند و در کامپوزیت‌های حفاظ تداخل الکترومغناطیسی اهمیت تجاری یافته‌اند. پراکندگی غیریکنواخت الیاف فلزی و افزایش وزن الیاف فلزی-پلیمری، پژوهشگران را به جست‌وجوی مواد حفاظ الکترومغناطیسی جایگزین واداشته است. اخیراً پرکننده‌های فلزی مانند روی اکسید (ZnO)، تیتانیم دی‌اکسید (TiO_2)، آهن اکسید (Fe_2O_3) و

کامپوزیت‌های برپایه پلی‌وینیل‌استات (PVA) و زیرکونیم دی‌اکسید نیز برای کاربردهای حفاظ تداخل الکترومغناطیسی مطالعه شده‌اند.

کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های برپایه کربن

به‌طور کلی، پرکننده‌های کربن نسبت ابعادی زیادی دارند، ازاین‌رو نانوکامپوزیت‌های برپایه کربن را می‌توان به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی استفاده کرد که رسانندگی الکتریکی زیادی به ماتریس پلیمری می‌دهند. پرکننده‌های کربنی مانند نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره (SWCNT)، چنددیواره (MWCNT)، الیاف کربن (CF)، الیاف گرافیت (GF) و کربن سیاه (CB) مواد پرکننده‌ای هستند که تاکنون با ترکیب‌های مختلف برای ایجاد اثربخشی حفاظتی زیاد استفاده شده‌اند. نانولوله‌های کربنی پوشش‌یافته [۵،۲۴] با ماتریس پلیمری مختلف مانند پلی‌آنیلین، پلی‌یورتان، آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن (ABS)، پلی‌متیل متاکریلات (PMMA)، اپوکسی، پلی‌پیرول، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌وینیلیدن فلوئورید و غیره در مطالعات متعدد برای بهبود اثربخشی حفاظ استفاده شدند. نانولوله‌های کربنی در مقایسه با سایر پرکننده‌های کربنی به‌دلیل هزینه کم، قطر کوچک، نفوذ آسان، رسانندگی الکتریکی و استحکام مکانیکی زیاد استفاده شده‌اند.

کامپوزیت‌های کربن سیاه–MWCNT برپایه پلی‌آنیلین، آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن، پلی‌اتیلن پرچگالی و پلی‌پروپیلن نیز به‌عنوان مواد مناسب برای تداخل الکترومغناطیسی مطالعه شده‌اند [۲۵]. مشخص شد، با افزایش غلظت کربن سیاه، اثربخشی حفاظ افزایش می‌یابد. کامپوزیت‌های برپایه الیاف کربن پیوسته در مقایسه با الیاف کربن ناپیوسته اثربخشی حفاظ بیشتری دارند. Huang و همکاران [۵،۲۶]، نیکل–کبالت پوشش‌یافته روی نانوالیاف دوکربنی را تهیه و مقادیر زیاد μ و σ را گزارش کردند. گرافیت تهیه‌شده با کامپوزیت پلی‌فنیلن سولفید نامزد مناسبی برای کاربردهای حفاظ الکترومغناطیسی، به‌ویژه در دماهای زیاد بود. نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با گرافن را می‌توان به‌عنوان ماده حفاظ تداخل الکترومغناطیسی حتی در غلظت‌های کم، به‌دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصربه‌فرد، استفاده کرد.

اختلاط محلول و مذاب، پرکاربردترین روش‌ها برای ساخت کامپوزیت‌های کربن–پلیمر هستند. مهم نیست، چه نوع روش آماده‌سازی انتخاب می‌شود. برای دستیابی به رسانندگی زیاد، باید شبکه‌های رسانای پیوسته در کامپوزیت‌های پلیمر رسانا ایجاد شود. ازاین‌رو، بارگذاری بحرانی نانوپرکننده برای دستیابی به بیش از آستانه نفوذ الکتریکی مورد نیاز است. آستانه نفوذ نانوکامپوزیت ارتباط نزدیکی با پراکندگی و نسبت ابعاد کلوخه‌ها دارد. بااین‌حال، معمولاً مقدار زیادی نانوپرکننده در کامپوزیت‌های پلیمر رسانا برای ایجاد شبکه رسانای مؤثر مورد نیاز است. حتی برای گرافن و نانولوله کربن با رسانندگی الکتریکی عالی، غلظت زیادی از پرکننده‌ها همچنان مورد نیاز است تا به آستانه نفوذ الکتریکی در کامپوزیت‌های حاصل از گرافن–پلیمر و نانولوله کربن–پلیمر برای محافظت از تداخل الکترومغناطیسی برسد. بدین دلیل، چنین مقدار زیادی از نانوپرکننده‌ها به تجمع تمایل دارند که درنهایت به چگالی و هزینه زیاد، خواص مکانیکی و فرایندپذیری ضعیف و حفاظ بازتاب الکترومغناطیسی زیاد از کامپوزیت‌های پلیمر رسانای نهایی منجر می‌شود [۵]. به‌طور کلی در اکثر کامپوزیت‌های پلیمر رسانا، نانوپرکننده‌های کربنی به‌طور تصادفی در ماتریس‌های پلیمری توزیع می‌شوند. بنابراین، مقدار پرکننده زیاد (۵۰٪ تا ۳۰٪ وزنی) برای دستیابی به اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی کافی (۲۰ dB) در کاربردهای عملی مورد نیاز است. باوجوداین، شبکه رسانا را می‌توان به‌راحتی با تغییر پراکندگی انتخابی و توزیع پرکننده‌های رسانا در ماتریس‌ها دستکاری کرد. این راهبرد به کامپوزیت‌های پلیمر رسانای نهایی این قابلیت را می‌دهد که خواص مکانیکی و اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی زیاد را در غلظت‌های نسبتاً کمتر پرکننده نشان دهند [۵].

کاربردهای مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برپایه پلیمر

مواد حفاظ الکترومغناطیسی برپایه پلیمر، کاربردهای بالقوه گسترده‌ای دارند. به‌عنوان مثال، در زندگی روزمره تداخل الکترومغناطیسی ممکن است باعث لرزش یا موج نوفه در صفحه نمایش تلویزیون، رادیو و لپ‌تاپ شود. افزون بر این، حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برای دستگاه‌هایی که در بسامدهای ریزموج کار می‌کنند، مانند قطعات الکترونیکی و پردازش ریزموج، مخابرات، مبدل‌ها، دستگاه‌های پزشکی، رسانش جانبی، هواپیماهای نظامی و تجاری، سامانه‌های نظارت راداری، محموله موشک‌ها، ابزار سنجش از راه دور و واحدهای فضایی که در خارج جو قرار دارند، مفیدتر می‌شود.

تجهیزات زیادی در بیمارستان‌ها وجود دارد که تابش‌های الکترومغناطیسی را تولید می‌کنند. بنابراین، حفاظ تداخل الکترومغناطیسی و سازگاری الکترومغناطیسی میان تجهیزات برای اطمینان از عملکرد سامانه‌های حیاتی و ایمنی عملگرهای ماشین بسیار مهم است. افزون بر این، حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برای کاشتینه‌های پزشکی مهم است، زیرا کاشتینه‌هایی مانند باطری قلب، پمپ‌های انسولین و سمعک‌ها، ممکن است در صورت قرارگیری تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی پرشدت از کار بیفتند [۲۷].

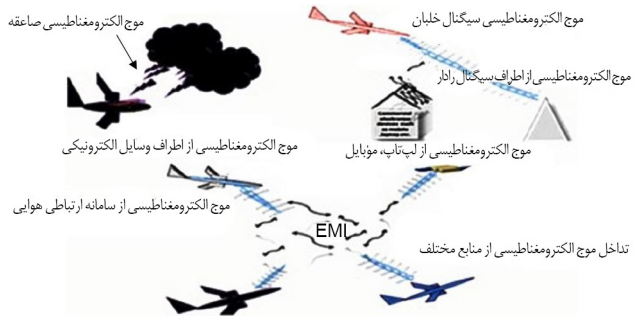
استفاده از باند K (۱۸ GHz تا ۲۷ GHz) در رادار حمل‌ونقل

هوشمند و خودرو در هشدار برخورد (حسگر تصادف)، تغییر خط و کمک نقاط کور ممکن است از تداخل الکترومغناطیسی مخرب آسیب ببیند. حفاظ تداخل الکترومغناطیسی در کاربردهای بسیار حساس مانند هوافضا و کنترل ارتباطات نیز مهم است. برای مثال، ماهواره‌هایی که در مدارهای پایین زمین قرار دارند، ممکن است به‌دلیل پرتوهای کیهانی پرانرژی و با تجمع بار روی آشکارساز با تداخل الکترومغناطیسی مواجه شوند. بنابراین در هنگام پرتاب و در مدار قرارگیری ماهواره به حفاظت مؤثر الکترومغناطیسی نیاز است. اگر کامپوزیت پلیمری سبک‌وزن بتواند عملکرد حفاظتی خوبی را به‌دست آورد، در این صورت صرفه‌جویی درخور توجهی در سوخت حاصل می‌شود [۵].

در زمینه نظامی، امواج الکترومغناطیسی بر حساسیت رادار، سامانه‌های آنتن و سامانه‌های کنترل الکترونیکی نظامی و غیره اثر می‌گذارد. همچنین، تداخل الکترومغناطیسی امنیت اطلاعات را تهدید می‌کند که درنهایت می‌تواند به درز اطلاعات سری و افشای مکان تجهیزات نظامی منجر شود. حفاظ تداخل الکترومغناطیسی نقش مهمی در دفاع ملی و امنیت ملی دارد. یک کاربرد معمولی حفاظ، تداخل الکترومغناطیسی در ارتش مخفی‌کاری است که با ازبین‌بردن بازتاب سیگنال رادار روی هدف، قابلیت تشخیص هدف را کاهش می‌دهد. مواد حفاظ الکترومغناطیسی با بازده و جذب زیاد اولین انتخاب برای جنگنده‌های نظامی رادارگریز است [۵].

کاربرد کامپوزیت‌های پلیمر-کربن سبک‌وزن در حفاظ تداخل الکترومغناطیسی

با توجه به اینکه دستگاه‌های الکترونیکی بیشتر به دنبال کوچک‌سازی، قابل‌حمل‌بودن و یکپارچه‌سازی هستند، تولید قطعات سبک‌وزن و آسان در مقیاس بزرگ از جمله پارامترهای کلیدی مورد نیاز برای مواد در بسیاری از کاربردهای نوظهور مانند هوافضا، هواپیما، خودروها و دستگاه‌های الکترونیکی هوشمند است. کامپوزیت‌های پلیمر-کربن سبک‌وزن به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی به‌دلیل خواص استثنایی آن‌ها مانند چگالی و هزینه کم، سهولت فراورش، مقاومت دربرابر خوردگی و خواص الکتریکی و مکانیکی قابل‌تنظیم، جذابیت شایان ملاحظه‌ای دارند و به‌عنوان نسل بعدی مواد کارآمد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی انعطاف‌پذیر درنظرگرفته شده‌اند [۵]. برای مثال، تابش‌های کم‌شدت و پرشدت روی فضا و تجهیزات هواپیما اثر می‌گذارند. تابش‌های کم‌شدت از بلوتوث تلفن‌های همراه، لپ‌تاپ و لوازم جانبی بی‌سیم و غیره ساطع می‌شود، در حالی که تابش پرشدت در



شکل ۷- نمایی از منابع مختلف تداخل الکترومغناطیسی هوافضا [۲۸].

اثر برخورد صاعقه یا انسان ایجاد می‌شود (شکل ۷). سرب به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی برپایه فلز، مفیدترین ماده حفاظ اقتصادی است، اما می‌تواند بر سلامت انسان اثر بگذارد [۲۸]. در سال‌های اخیر، مواد جاذب موج الکترومغناطیسی فشرده، به‌دلیل کاربردهای آن‌ها در حفاظ تداخل الکترومغناطیسی و کاهش مقطع رادار در محدوده GHz توجه زیادی را جلب کرده‌اند. بااین‌حال، وزن مخصوص زیاد، کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. کامپوزیت‌های پلیمر-کربن سبک‌وزن این قابلیت را دارند که جایگزین حفاظ فلزی تجهیزات اویونیک (avionic) یا الکترونیکی در وسایل نقلیه هوایی و سامانه‌های پدافند هوایی شوند که دربرابر اختلالات پالس EMI و الکترومغناطیسی آسیب‌پذیر هستند [۲۸].

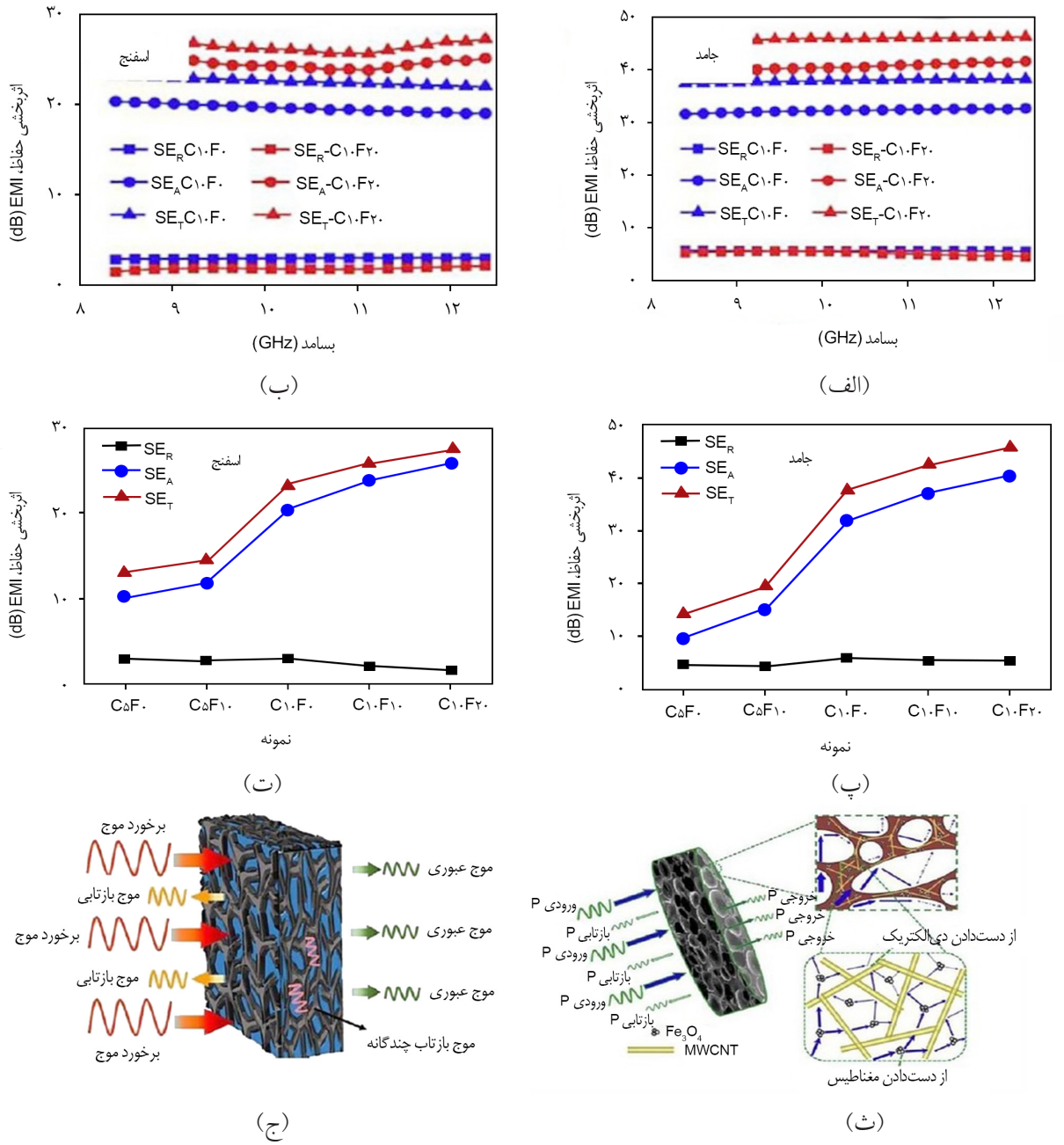
در عصر مخابرات ۵G، برخورد با تابش الکترومغناطیسی و گرمای تولیدشده به‌وسیله دستگاه‌های الکترونیکی و ارتباطی پربسامد و پرتوان از مسائل کلیدی است [۵،۲۸]. محصولات الکترونیکی و ایستگاه‌های ارتباطی با دستگاه‌های حفاظ تداخل الکترومغناطیسی به‌طور روزافزون طراحی می‌شوند. توسعه سریع فناوری‌های بی‌سیم و مخابراتی، تقاضاهای سخت‌گیرانه‌تری را درباره مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی مانند عملکرد باند پهن، تنظیم‌پذیری، انتخاب بسامد و غیره ایجاد می‌کند. کامپوزیت‌های پلیمر-کربن سبک‌وزن دارای سازوکار حفاظ تداخل الکترومغناطیسی غالب جذب و مزایای انعطاف‌پذیری و فراورش آسان هستند که آن‌ها را نامزدهای امیدبخشی برای مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی دستگاه‌های مخابراتی ۵G آینده می‌سازد [۵].

ساختار اسفنجی

برای الزامات سبک‌وزنی، استحکام کششی و عملکرد حفاظ الکترومغناطیسی زیاد، مواد با ساختار اسفنجی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین، دیواره‌های سلولی ساختار اسفنجی می‌توانند رابط‌های متعددی را فراهم کرده که می‌تواند امواج الکترومغناطیسی

را چند بار بازتاب و جذب کنند که برای بهبود عملکرد حفاظت مواد حفاظ مفید است. رابط‌های متعدد فراهم‌شده به‌وسیله دیواره‌های سلولی ساختار اسفنجی مواد حفاظ الکترومغناطیسی برای بازتاب و جذب امواج الکترومغناطیسی چندگانه مفید است که درنتیجه عملکرد حفاظت مواد را بهبود می‌بخشد. به‌طور کلی، سه روش اصلی برای تهیه مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی با ساختار اسفنجی وجود دارد که عبارت از پف‌کردن فیزیکی و شیمیایی و خشک‌کردن انجمادی است. در روش پف‌کردن فیزیکی برای تهیه اسفنج حفاظ تداخل الکترومغناطیسی معمولاً عوامل پف‌زا مانند کربن دی‌اکسید ابر بحرانی و ریزگوی‌های منبسط‌شده [۲] را مستقیماً به ماده پایه تزریق می‌کنند تا مواد اسفنجی به‌دست آید. در تهیه اسفنج حفاظ تداخل الکترومغناطیسی با اسفنج‌کردن شیمیایی به استفاده از واکنش‌های شیمیایی مواد برای انتشار گاز اشاره دارد که می‌تواند سلول‌های داخل ماده را تشکیل دهد.

خشک‌کردن انجمادی به‌عنوان یک فناوری ساخت پیشرفته جدید توسعه‌یافته، می‌تواند برای کنترل دقیق ساختار درشت‌مواد استفاده



(الف) (ب) (پ) (ت) (ث) (ج)

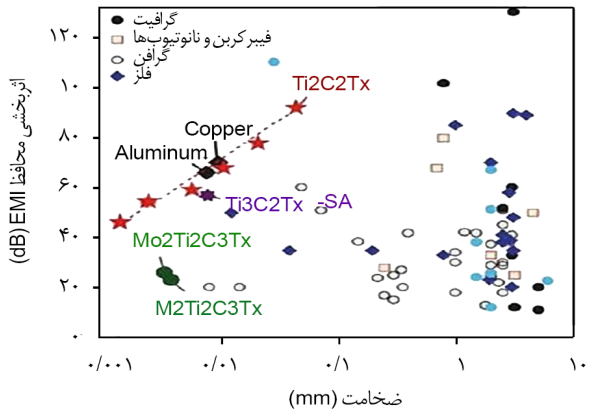
شکل ۸- (الف) تا (ت) SER، SEA و SET نانوکامپوزیت‌های جامد و اسفنج رسانا، (ث) نمایی از اتلاف امواج الکترومغناطیسی در اسفنج‌های VMQ/MWCNTs/Fe_3O_4 و (ج) نانوکامپوزیت‌های GNP/rGO/EP [۲].

قرار گیرد و به‌سرعت به روش مؤثری برای طراحی و توسعه مواد کاربردی پیشرفته تبدیل شده است [۲،۳]. پژوهشگران نوعی لاستیک متیل‌وینیل سیلیکونی سبک و انعطاف‌پذیر VMQ/MW-CNTs/Fe_3O_4 اسفنج نانوکامپوزیت را ازطریق فرایند کف‌کردن کربن دی‌اکسید ابربحرانی (Sc-CO_2) را تهیه کردند [۳]. همان‌طور که در شکل ۸الف تا ج نشان داده شده است، سازوکار حفاظ اصلی اسفنج پس از ترکیب نانوذرات Fe_3O_4 عمدتاً ازدست‌دادن جذب است و اسفنج لاستیکی سیلیکونی نرم پس از خمش مکرر، همچنان پایداری حفاظ الکترومغناطیسی عالی را حفظ می‌کند. همان‌طور که در شکل ۸ث نشان داده شده است، ظرفیت جذب بسیار بهبودیافته اسفنج‌های نانوکامپوزیتی VMQ/MWCNTs/Fe_3O_4 به ساختار ویژه اسفنج برای ازدست‌دادن امواج الکترومغناطیسی و نانوذرات Fe_3O_4 با خواص مغناطیسی خوب بستگی دارد. نانوکامپوزیت‌های نانوصفحه‌های متخلخل گرافن سه‌بعدی-اسفنج گرافن اکسید کاهش‌یافته-اپوکسی (GNPs/rGO/EP) برای حفاظت الکترومغناطیسی تهیه می‌شوند. در این نانوکامپوزیت‌ها، اسفنج گرافن اکسید کاهش‌یافته (rGO) سه‌بعدی تعبیه‌شده در نانوصفحات گرافن یک شبکه رسانا و گرمایی سه‌بعدی را در ماتریس اپوکسی می‌سازد.

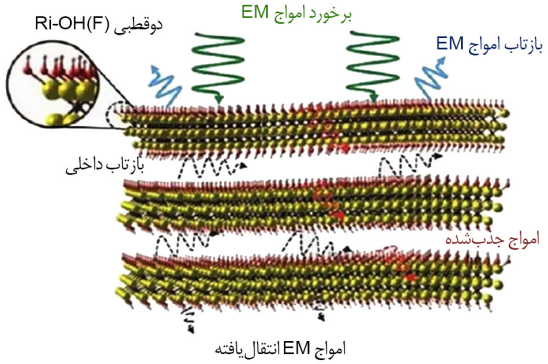
شکل ۸ج، نمایی از امواج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که از نانوکامپوزیت‌های GNP/rGO/EP عبور می‌کنند. شبکه rGO به‌عنوان بستر مؤثری برای نانوصفحه‌های گرافن عمل کرده و تا نوعی شبکه پراکندگی و رسانندگی مؤثر را تشکیل دهند. نانوکامپوزیت‌های GNP/rGO/EP با بهره‌مندی از ساختار شبکه ویژه، اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی را برابر با ۵۱ dB در باند X نشان دادند که در مقایسه با rGO/EP و GNP/EP به‌ترتیب ۲۹۲ و ۲۴۰٪ بهبود یافته است.

ساختار لایه‌ای

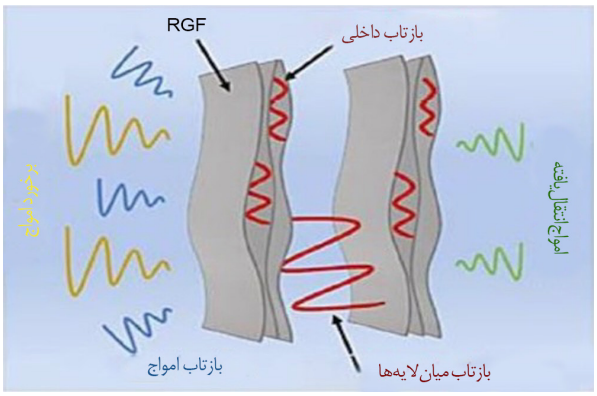
مواد حفاظ الکترومغناطیسی با ساختارهای لایه‌ای به‌دلیل مزایای جذب بازتاب چند رابط [۲] توجه بیشتری را جلب کرده‌اند. ظهور گرافن، مکسین (MXene) و سایر مواد دوبعدی قابلیت بالقوه زیادی را برای تهیه مواد انعطاف‌پذیر چندلایه با رسانندگی زیاد در کاربردهای حفاظ الکترومغناطیسی ایجاد کرده است. پژوهشگران مکسین‌هایی با ساختار گرافن‌مانند را با لایه‌های انعطاف‌پذیر بسیار رسانا تهیه کرده‌اند که عملکرد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی بسیار خوبی نشان داده‌اند. آن‌ها دریافتند، اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی فیلم کامپوزیت با ضخامت ۴۵ µm به حدود dB



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۹- (الف) و (ب) مقایسه اثربخشی حفاظ تداخل الکترومغناطیسی با متون قبلی و سازوکارهای حفاظت [۲۹]، (پ) نمایی از امواج الکترومغناطیسی که در سراسر کامپوزیت‌های حفاظ تداخل الکترومغناطیسی rGFs/EP منتقل می‌شوند [۳۰].

۹۲ می‌رسد [۲۹]. لایه‌های فرانازک MXene، به‌طور درخور توجهی نسبت به مواد مصنوعی شناخته‌شده برتری دارند و در بالای جدول مقایسه قرار می‌گیرند (شکل ۹الف). همان‌طور که در شکل ۹ب نشان داده شده است، ساختار لایه‌ای شرایطی را برای بازتاب و جذب چند رابط امواج الکترومغناطیسی ایجاد می‌کند و عملکرد حفاظ تداخل

الکترومغناطیسی فیلم‌های کامپوزیتی را بهبود می‌بخشد. لایه‌های نازک گرافن اکسید کاهش‌یافته، ابتدا با روش‌های کاهش شیمیایی و گرمایی تهیه می‌شوند. سپس، لایه‌های نازک گرافن اکسید به‌منظور تهیه کامپوزیت‌های rGF/EP به‌عنوان مواد حفاظ تداخل الکترومغناطیسی به ماتریس رزین اپوکسی وارد می‌شوند [۳۰]. عملکرد برتر حفاظ تداخل الکترومغناطیسی کامپوزیت‌های rGFs/EP عمدتاً به بازتاب و جذب امواج الکترومغناطیسی مختلف به‌وسیله ساختار لایه‌ای و همچنین پراکندگی بین و درون لایه‌های rGFs نسبت داده می‌شود. سازوکار حفاظ در شکل ۹پ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

با توسعه علم و فناوری و استفاده بیش از حد از وسایل الکترونیکی، محصول جانبی ناخواسته و نامطلوبی به نام تداخل الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. تداخل الکترومغناطیسی در صورت عدم مراقبت می‌تواند به پدیده‌های نامطلوب منجر شود و زندگی فردی و کاربردهای نیازمند دقت زیاد را در جامعه تحت‌الشعاع قرار دهد. بهترین راه برای جلوگیری از تابش‌های الکترومغناطیسی، ساختن مجموعه‌ای از موانع از ماده رسانا یا مغناطیسی برای جلوگیری از امواج الکترومغناطیسی است که به آن‌ها حفاظ تداخل الکترومغناطیسی گفته می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، انواع مختلفی از مواد به‌عنوان حفاظ برای جلوگیری از انتشار تابش‌های الکترومغناطیسی وجود دارد. همچنین، مواد فلزی و کامپوزیت‌های آن‌ها می‌توانند عملکرد حفاظتی خوبی داشته باشند، ولی وزن زیاد و برخی از ویژگی‌های آن‌ها نظیر مقاومت دربرابر خوردگی کم، فرایندپذیری دشوار و غیره باعث محدودشدن کارایی آن‌ها شده است. بررسی مواد حفاظ پایه‌پلیمری و کامپوزیت‌های آن‌ها نشان داد، باتوجه به حرکت فناوری به سمت تولید قطعات سبک و کارا، مواد پلیمری از لحاظ فرایندپذیری و مقاومت‌های خوب محیطی می‌توانند به‌عنوان یکی از بهترین مواد حفاظ امواج الکترومغناطیسی به‌شمار روند. همچنین، کامپوزیت‌های پایه‌پلیمری دارای ذرات فلزی مزایا و معایبی دارند. از عیوب و مزایای آن‌ها به‌ترتیب می‌توان به افزایش وزن کامپوزیت و اثربخشی حفاظت خوب آن‌ها اشاره کرد. بنابراین می‌توان گفت، وزن زیاد باعث محدودیت در کاربرد آن‌ها می‌شود. درمقابل، کامپوزیت‌های پایه‌پلیمری برپایه پرکننده‌های کربنی هم از نظر اثربخشی حفاظ و هم از لحاظ وزن و شرایط محیطی می‌توانند نیازهای ما را برای حفاظت خوب و مفید دربرابر امواج الکترومغناطیسی برآورده کنند. البته باید درنظر داشت، میزان افزودن نانوپرکننده‌ها به ماتریس پلیمری باید بادقت و درستی انجام شود تا بتواند اثربخشی حفاظت خوبی را ارائه دهد.

مراجع

1. Kondawar S.B. and Modak P.R., Theory of EMI Shielding, *Materials for Potential EMI Shielding Applications*, Elsevier, Amsterdam, 9-25, 2020.
2. Yao Y., Jin S., Zou H., Li L., Ma X., Lv G., Gao F. et al., Polymer-Based Lightweight Materials for Electromagnetic Interference Shielding: A Review, *J. Mater. Sci.*, **56**, 6550-6580, 2021.
3. Yang J., Liao X., Li J., He G., Zhang Y., Tang W., Wang G. et al., Lightweight and Flexible Silicone Rubber/MWCNTs/Fe_3O_4 Nanocomposite Foam for Efficient Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption, *Compos. Sci. Technol.*, **181**, 107670, 2019.
4. Sathish Kumar K., Rengaraj R., Venkatakrishnan G.R., and Chandramohan A., Polymeric Materials for Electromagnetic Shielding: A Review, *Mater. Today: Proc.*, **47**, 4919-5508, 2021.
5. Liu S., Qin S., Jiang Y., Song P., and Wang H., Lightweight High-Performance Carbon-Polymer Nanocomposite for Electromagnetic Interference Shielding, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **145**, 106376, 2021.
6. Sun Y., Long N.J., Sidorov G., Fang J., Badcock R.A., and Jiang Z., Shielding Effect of (RE)$Ba_2Cu_3O_{7-d}$-Coated Conductors on Eddy Current Loss of Adjacent Metal Layers under AC Magnetic Fields with Various Orientations, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **31**, 3011390, 2020.
7. Singh A.K., Shishkin A., Koppel T., and Gupta N., A Review of Porous Lightweight Composite Materials for Electromagnetic Interference Shielding, *Compos. B: Eng.*, **149**, 188-197, 2018.
8. Morari C., Balan I., Pintea J., Chitanu E., and Iordache I., Electrical Conductivity and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Silicone Rubber Filled with Ferrite and Graphite Powders, *Prog. Electromagn. Res. M.*, **21**, 93-104, 2011.
9. Kumar R., Sahoo S., Joanni E., Singh R.K., Tan W.K.,

Kar K.K., and Matsuda A., Recent Progress on Carbon-Based Composite Material for Microwave Electromagnetic Interference Shielding, *Carbon*, **177**, 304-331, 2021.

10. Sankaran S., Deshmukh K., Ahamed M.B., and Khadheer Pasha S.K., Recent Advances in Electromagnetic Interference Shielding Properties of Metal and Carbon Filler Reinforced Flexible Polymer Composites: A Review, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **114**, 49-71, 2018.
11. Kim Y., Park S., and Seo Y., Enhanced X-Ray Shielding Ability of Polymer-Nonleaded Metal Composites by Multilayer Structuring, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **22**, **54**, 5968-5973, 2015.
12. Yarahmadi E., Bahri N., and Didehban K., Polymer Composites as Electromagnetic Wave Absorbers, *Polymerization (Persian)*, **6**, 13-22, 2015.
13. Hu X.-S. and Shen Y., Fabrication of Novel Polyaniline/ Flowerlike Cooper Monosulfide Composites with Enhanced Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 45232, 2017.
14. Lee J., Liu Y., Liu Y., Park S.-J., Park M., and Kim H.Y., Ultrahigh Electromagnetic Interference Shielding Performance of Lightweight, Flexible, and Highly Conductive Cooper-Clad Carbon Fiber Nonwoven Fabrics, *J. Mater. Chem. C*, **5**, 7853-7861, 2017.
15. Luo Z., Chen X.-H., Song K., Liu C.-Q., Dai Y., Zhao D., and Pan F.-S., Effect of Alloying Element on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Binary Magnesium Alloys, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, **32**, 817-824, 2019.
16. Dou Z., Wu G., Huang X., Sun D., and Jiang L., Electromagnetic Shielding Effectiveness of Aluminum Alloy-Fly Ash Composites, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **38**, 186-191, 2007.
17. Kumar R., Kumari S., and Dhakate S.R., Nickel Nanoparticles Embedded in Carbon Foam for Improving Electromagnetic Shielding Effectiveness, *Appl. Nanosci.*, **5**, 553-561, 2015.
18. Liu P.S. and Cui G., Characterization of The Electromagnetic Shielding Compressive Behavior of a Highly Porous Titanium Foam with Spherical Pores, *J. Mater. Res.*, **30**, 3510-3517, 2015.
19. Ji K., Zhao H., Zhang J., Chen J., and Dai Z., Fabrication and Electromagnetic Interference Shielding Performance of Open-Cell Foam of a Cu-Ni Alloy Integrated with CNTs, *Appl. Surf. Sci.*, **311**, 351-356, 2014.
20. Du S.G., Cui H.P., Yan J., and Wang M.-Q., Study of the Electromagnetic Shielding Efficiency of Ni-Cu-P Amorphous Alloy Film on The Surface of PVC, *Adv. Mat. Res.*, **452**, 101-105, 2012.
21. Hamidinejad M., Zhao B., Zandieh A., Moghimian N., Filleter T., and Park C.B., Enhanced Electrical and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Polymer-Graphene Nanoplatelet Composites Fabricated Via Supercritical-Fluid Treatment and Physical Foaming, *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 30752-30761, 2018.
22. Abbasi H., Antunes M., and Velasco J.I., Recent Advances in Carbon-Based Polymer Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding, *Prog. Mater. Sci.*, **103**, 319-373, 2019.
23. Wu Y., Wang Z., Liu X., Shen X., Zheng Q., Xue Q., and Kim J.-K., Ultralight Graphene Foam/Conductive Polymer Composite for Exceptional, Electromagnetic Interference Shielding, *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 9059-9069, 2017.
24. Ghosh S., Remanan S., Mondal S., Ganguly S., Das P., Singha N., and Das N.C., An Approach to Prepare Mechanically Robust Full IPN Strengthened Conductive Cotton Fabric for High Strain Tolerant Electromagnetic Interference Shielding, *Chem. Eng. J.*, **364**, 138-154, 2018.
25. Shen B., Li Y., Zhai W., and Zheng W., Compressible Graphene-Coated Polymer Foams with Ultralow Density for Adjustable Electromagnetic Interference (EMI) Shielding, *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, **8**, **12**, 8050-8057, 2016..
26. Jin X., Wang J., Dai L., Liu X., Li L., Yang Y., Cao Y. et al., Flame-Retardant Poly(vinyl alcohol)/MXene Multilayered Films without Standing Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Conductive Performances, *Chem. Eng. J.,* **380**, 122475, 2020.
27. Barathi Dassan E.G., Anjang A., Zainol Abidin M.S., and Akil H.M., Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composite for Electromagnetic Interference Application: A Review, *Nanotechnol. Rev.*, **9**, 768-788, 2020.
28. Jaroszewski M., Thomas S., and Rane A.V., *Advanced Material for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 177-217, 2018.
29. Shahzad F., Alhabeb M., Hatter C.B., Anasori B., Hong S.M., Koo C.M., and Gogotsi Y., Electromagnetic Interference Shielding With 2D Transition Metal Carbides (MXenes), *Science*, **353**, 1137-1140, 2016.
30. Liang C., Song P., Qiu H., Huangfu Y., Lu Y., Wang L., Kong J. et al., Superior Electromagnetic Interference Shielding Performances of Epoxy Composites by Introducing Highly Aligned Reduced Graphene Oxide Films, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **124**, 105512, 2019.