

مروری بر مکانیسم و عملکرد جاذب‌های امواج الکترومغناطیس ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری

علی رشیدی^۱ غلامرضا کیانی^۲ رحیمه نصرتی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
alirashidi.ir@gmail.com

۲- دانشیار- گروه شیمی آلی و بیوشیمی- دانشکده شیمی- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
g.kiani@tabrizu.ac.ir

۳- محقق پسا دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
ra.nosrati@gmail.com

چکیده: رشد گسترده دستگاه‌های الکترونیکی و دستگاه‌های ارتباطی و استفاده گسترده از تجهیزات از قبیل رادارها، دستگاه‌های ارتباطی تلفن همراه، GPS و وسایل خانگی در سال‌های اخیر، موجب افزایش تداخل امواج الکترومغناطیس شده است که در نتیجه آلودگی مغناطیسی را افزایش داده است. جذب و سپر سازی در برابر این امواج برای کاهش آلودگی امواج الکترومغناطیس در کاربردهای مختلف احساس می‌شود. این آلودگی باعث عملکرد نادرست دستگاه‌های الکترونیکی و مخابراتی می‌شود و همچنین موجب آسیب به ساختارهای بیولوژیکی و گونه‌های زنده موجود در محیط زیست می‌شود. از کاربردهای گسترده جاذب امواج الکترومغناطیس در صنایع نظامی می‌توان به فناوری اختفا اشاره کرد که باعث استتار و اختفای هدف مورد نظر با حذف سیگنال بازتابی از هدف به رادار می‌شود. در نتیجه هدف از تهیه جاذب امواج الکترومغناطیس تولید کامپوزیت و یا پوششی است که توانایی جذب امواج برای رادار گریزی در صنایع نظامی و محافظت بافت‌های زنده در برابر امواج الکترومغناطیس و همچنین محافظت از دستگاه‌های الکترونیکی و مخابراتی در برابر امواج مزاحم را داشته باشد. نانوکامپوزیت‌های شامل پلیمرهای رسانا ساختارهای مناسبی برای کارکرد در این حوزه دارند. در مقاله حاضر مکانیسم و عملکرد جاذب‌های امواج الکترومغناطیس با محوریت پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: جاذب امواج الکترومغناطیس، نانو کامپوزیت، پلیمر، مکانیسم، عملکرد

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.4.115

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۸/۱۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۲/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر غلامرضا کیانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تبریز- دانشگاه تبریز- دانشکده شیمی- گروه شیمی آلی و بیوشیمی

۱- مقدمه

می‌شود و پیش می‌رود. خواص مواد با توجه به روابط زیر در تحلیل امواج الکترومغناطیس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (۴)$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (۵)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (۶)$$

که علاوه بر متغیرهای معرفی شده قبلی: $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} (F/m)$ برابر با ثابت گذردهی هوا، $\mu_0 = 0.4 \times 10^{-6} (H/m)$ برابر با ثابت تراوایی هوا، ϵ_r : ضریب گذردهی وابسته مختلط^۵، μ_r : ضریب تراوایی وابسته مختلط^۵ و $\sigma (S/m)$: هدایت مواد^۶ می‌باشند. ضریب گذردهی وابسته مختلط و ضریب تراوایی وابسته مختلط به صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' + i \epsilon_r'' \quad (۷)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' + i \mu_r'' \quad (۸)$$

که در این صورت معادله ۵ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mu \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (۹)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = \nabla \times \vec{J} \quad (۱۰)$$

که c سرعت نور است و برابر است با:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (۱۱)$$

برای یک میدان هماهنگ^۷ مثل معادله (۱۲):

$$\vec{E}(r, t) = \vec{E}(r) e^{j \omega t} \quad (۱۲)$$

معادله موج را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = j \omega \mu \vec{J} + \nabla \nabla \cdot \vec{E} \quad (۱۳)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای است. اگر حالت فضای آزاد ($\sigma=0$) در نظر گرفته شود، در این صورت معادله‌ی بالا به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 e^{-j(\hat{k} \cdot \hat{R} - \omega t)} \quad (۱۴)$$

که K جهت بردار انتشار موج با طول موج $\lambda = \frac{2\pi}{\omega}$ است. اگر

یک میدان مغناطیسی فرض شود که به صورت زیر است:

فناوری جذب امواج الکترومغناطیس در ناحیه ریز موج، موضوع ارزشمندی برای مقاصد تجاری، نظامی، وسایل ارتباطی و بسیاری از سامانه های الکترونیکی و فناوری در عصر حاضر است که برای محافظت از دستگاه‌های الکترونیکی و مخابراتی و هم چنین ساختارهای بیولوژیکی و گونه‌های زنده‌ی ضروری است. به طور معمول، جاذب‌های امواج الکترومغناطیس از میان فلزات واسطه، مواد معدنی، پلیمرهای رسانا و کامپوزیت‌های آنها انتخاب می‌شوند. در این میان، نانو کامپوزیت‌های پلیمری نقش مهمی را در پژوهش‌های این زمینه ایفا می‌کنند. هنگامی که ابعاد ساختارهای ترکیبات به مقیاس نانو کاهش می‌یابد، آثار قابل توجهی را روی خواص مکانیکی، نوری، گرمایی و همچنین جذب امواج الکترومغناطیس آنها می‌گذارند. در مقاله حاضر سعی شده است مکانیسم و عملکرد جاذب‌های امواج الکترومغناطیس به خصوص پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمری مورد بررسی قرار گیرد.

۲- امواج الکترومغناطیس و ویژگی‌های آنها

انرژی یا تابش الکترومغناطیسی، پدیده‌ای موجی شکل است که در فضا انتشار می‌یابد و از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده است. این میدان‌های در حال انتشار، بر یکدیگر و بر جهت پیشروی موج عمود هستند.

وقتی که یک موج الکترومغناطیس به سطح یک جسم رسانا برخورد می‌کند الکترون‌ها برانگیخته می‌شوند و جریان سطحی^۱ را تولید می‌کنند. جریان سطحی، انرژی موج الکترومغناطیسی را که به‌طور موقت روی سطح جسم به وجود آمده است را منتقل می‌کند. این انرژی یا توسط جسم جذب می‌شود یا بازتاب می‌شود. روابط و تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، بارها و جریان‌های مرتبط با امواج الکترومغناطیس بر اساس قوانین فیزیکی به نام معادلات ماکسول شناخته می‌شوند که به صورت زیر می‌باشند:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{-\partial B}{\partial t} - \vec{M} \quad (۱)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۲)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (۳)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (۴)$$

که E: شدت میدان الکتریکی (V/m)، D: جریان جابجایی (C/m²)، B: جریان القایی مغناطیسی (T or Wb/m²)، H: شدت میدان مغناطیسی (A/m)، p: چگالی بار الکتریکی (C/m³)، J: چگالی جریان الکتریکی (A/m²) و t: زمان (s) می‌باشند.

طبق معادلات ماکسول، میدان الکتریکی متغیر با زمان، باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود و میدان مغناطیسی متغیر با زمان، باعث ایجاد میدان الکتریکی می‌شود و این‌گونه موج الکترومغناطیسی ساخته

$$|R|(dB) = 20 \log_{10} |R| \quad (۲۰)$$

$$\vec{H}(r) = \frac{k}{\omega \mu} \cdot \hat{k} \times \vec{E}(r) \quad (۱۵)$$

که در رابطه بالا k برابر است با:

$$k = (\omega^2 \mu \epsilon)^{1/2} \quad (۱۶)$$

نسبت بزرگی E به H را امپدانس موج^۱ می‌گویند که برابر است با:

$$\frac{E}{H} = \frac{\omega \mu}{k} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z \quad (۱۷)$$

از رابطه‌ی بالا مشخص است که امپدانس موج به تراوایی و گذردهی وابسته است. برای اینکه امپدانس نرمالیزه باشد، امپدانس که از رابطه بالا به دست می‌آید به امپدانس هوا تقسیم می‌شود که در نتیجه رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (۱۸)$$

به طور خلاصه، معادله موج الکترومغناطیسی از معادلات ماکسول حاصل می‌شود و نشان می‌دهد که موج الکترومغناطیسی شامل امواج مغناطیسی و الکتریکی است. نسبت E به H که به عنوان امپدانس موج می‌شناسیم با متوسط ضریب تراوایی و ضریب گذردهی ارتباط دارد. Z_0 امپدانس خلأ است که برابر است با 120π که تقریباً مقدار آن 337Ω است. میدان دور^۱، به ناحیه‌ای که بزرگ‌تر است از $\lambda / 2\pi$ باشد، گفته می‌شود که λ برابر طول موج است. در میدان دور، موج به صورت موج تخت بیان می‌شود، به دلیل اینکه در میدان دور، موج‌های الکترومغناطیسی اساساً انحنای خودشان را از دست می‌دهند و سطحی که شامل E و H است، تخت می‌شود. وقتی که یک موج به سطحی از جسم برخورد می‌کند، یا از سطح بازتاب می‌شود یا به درون آن نفوذ می‌کند. بازتاب آن به جنس سطح و فرکانس انتشار موج بستگی دارد. ضریب بازتاب (R) برای تابش نرمال با امپدانس نرمالیزه شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\frac{Z}{Z_0} - 1}{\frac{Z}{Z_0} + 1} \quad (۱۹)$$

با توجه به R ، به طور معمول، زاویه فاز نادیده گرفته می‌شود و تنها دامنه R در dB ذکر می‌شود که داریم:

امپدانس موج نشان می‌دهد که چگونه ضریب گذردهی و ضریب تراوایی می‌تواند روی ضریب بازتاب اثرگذار باشد.

از ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- این امواج دارای سرعت و ماهیت یکسان هستند و فقط از لحاظ بسامد یا طول موج باهم متفاوت هستند.
- در طیف امواج الکترومغناطیسی هیچ شکافی وجود ندارد و هر فرکانس دلخواهی در دسترس است.
- این امواج می‌توانند در محیط خلأ هم انتشار یابند و نیاز به محیط مادی ندارند.
- سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی باهم برابر بوده و با توجه به معادلات ماکسول برابر با سرعت نور به دست می‌آید [۳، ۲، ۱].

۳- طیف امواج الکترومغناطیسی و محدوده میکروویو

طیف امواج الکترومغناطیسی، بازه گسترده‌ای از امواج با کاربردهای مختلف را شامل می‌شود. این بازه، از فرکانس‌های خیلی کم (ELF/VLF) شروع می‌شود و بعد از آن به امواج رادیویی و میکروویو و سپس به امواج نوری و در نهایت به امواج اشعه X و اشعه گاما که طول موج خیلی کوتاهی دارند می‌رسد. بدیهی است که این محدوده وسیع، باعث افزایش کاربرد این امواج در جنبه‌های مختلف علوم و زندگی بشر می‌گردد. طول موج‌های کمتر از 1 نانومتر که امواج گاما و ایکس را شامل می‌شود در مصارف صنعتی و پزشکی کاربرد دارند. طول موج‌های در محدوده 1 نانومتر تا 100 میکرومتر که شامل امواج مادون قرمز، مرئی و ماورای بنفش می‌گردد و در مواردی چون دستگاه‌های کنترل از راه دور، دیدبانی در شب، انتقال اطلاعات به وسیله فیبر نوری، ردیابی اجسام و لیزر استفاده می‌گردند. امواج 100 میکرومتر تا 10 سانتی‌متر که میکروویو نامیده می‌شوند. در کاربردهایی چون تلفن همراه، مایکروفر و رادارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. امواج با طول موج 1 متر تا چندین کیلومتر در صداوسیما و رادیو مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴].

۴- امواج میکروویو و کاربردهای آن

محدوده فرکانسی 3 تا 300 گیگاهرتز که طول موجی بین 1 میلی‌متر تا 10 سانتی‌متر را شامل می‌شود، محدوده امواج میکروویو می‌گویند. جدول (۱) دسته‌بندی این محدوده را نشان می‌دهد. از جمله کاربردهایی که برای امواج میکروویو وجود دارد، استفاده از این امواج در ساخت رادارها، آنتن‌ها، ارتباطات بین تلفن‌های همراه، GPS و ساخت اجاق میکروویوی است. کاربردهای بیشتری از این امواج در جدول (۲) نمایش داده شده است [۱، ۲]. محدوده X-band شامل فرکانس‌های 8 تا 12 گیگاهرتز است که بسیاری از سامانه‌های نظامی و تجاری مانند رادار آب‌وهوا، رادار

جهت انتشار امواج رادار، فرکانس مورد استفاده در انتقال‌دهنده‌ی رادار و نوع مواد مصرفی وابسته است [۱].

۶-۱- روش‌های کاهش سطح مقطع راداری

چهار روش به‌منظور کاهش سطح مقطع راداری وجود دارد که عبارتند از: شکل‌دهی^{۱۴}، مواد جاذب رادار، حذف فعال^{۱۵} و حذف غیر فعال^{۱۶} که شکل‌دهی و مواد جاذب رادار از اهمیت بالاتری برخوردار هستند [۲].

۶-۱- شکل‌دهی

مقدماتی‌ترین روش برای کاهش سیگنال برگشتی روش شکل‌دهی است. معنای شکل‌دهی این است که لبه‌ها و سطح جسم به شکلی طراحی گردد تا انرژی بازتابی از جسم، در غیر از جهت رادار منعکس گردد. در واقع با طراحی دقیق، از انعکاس امواج به منبع اصلی جلوگیری می‌شود. بدین منظور از تراش‌ها، بریدگی‌ها و انحناها استفاده می‌شود. اگرچه شکل‌دهی بسیار اهمیت دارد اما به‌کارگیری این روش به‌تنهایی احتمال ردیابی توسط برخی رادارها را افزایش می‌دهد [۲].

۶-۲- حذف غیرفعال

این روش نیز وابسته به طراحی جسم است، به این صورت که بایستی طراحی جسم به‌گونه‌ای باشد که موج بازتابی از هدف توسط موج‌های بازتابی دیگر خنثی گردد. در واقع دامنه و فاز موج‌های انعکاسی بایستی هم‌دیگر را خنثی نمایند. با طراحی مناسب سطح می‌توان حفره‌هایی به‌صورت تله ایجاد نمود تا عمل خنثی‌سازی حتی به تقویت امواج منجر گردد [۲].

۶-۳- حذف فعال

این روش به‌منظور برطرف‌سازی مشکلات حذف غیرفعال ابداع گردید. در این روش جسم با انتشار امواج در مقابل امواج رادار، انرژی را خنثی می‌نماید و مانع بازگشت امواج می‌گردد. در حقیقت در این روش جسم باید هوشمند باشد تا هنگام انتشار امواج رادار، طول موج و فرکانس آن را اندازه‌گیری نماید و به‌صورت متقابل امواجی را منتشر نماید تا قابلیت خنثی‌سازی را داشته باشد. این روش بسیار پیچیده است؛ بنابراین طراحی بایستی آن‌قدر دقیق انجام شود تا امواج انتشاری برعکس عمل نمایند و به‌صورت یک آشکارساز عمل نکنند [۲].

۶-۴- مواد جاذب رادار (RAM)

مهم‌ترین روش در فناوری استتار استفاده از مواد جاذب رادار است. نکته‌ی مهم در مورد مواد جاذب رادار کاهش سطح مقطع راداری است. یک ماده‌ی جاذب رادار مطلوب بایستی نازک، سبک، مقاوم، ارزان و با کاربرد آسان باشد و پهنای باند وسیعی را در بر بگیرد. در حقیقت بسیاری از مواد جاذب رادار از مواد پر اتلاف ساخته شده‌اند که مکانیسم اتلافی را ایجاد می‌کنند، در این مکانیسم پراکندگی انرژی با

دریایی، ردگیری هواپیما، هدایت موشک، انتقال تصویر تلویزیون و سامانه‌های تلفن همراه در فرکانس باند X کار می‌کنند که بیشترین کاربرد آن در محدوده رادار است. از این‌رو عایق‌سازی امواج الکترومغناطیس و جذب

امواج باند X از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای اینکه بتوانیم عایق‌سازی و جذب امواج رادار را بررسی کنیم باید با سیستم رادار و مبثی به اسم سطح مقطع راداری^{۱۷} آشنا شویم [۲، ۵].

۵- سیستم رادار و سطح مقطع راداری (RCS)

رادار و تشخیص^۱ سیگنال‌های رادیویی از قدیمی‌ترین کاربردهای فناوری امواج میکروویو است. در یک عملکرد پایه‌ای، یک فرستنده، سیگنال‌هایی را به سوی هدف ارسال می‌کند و بخشی از این سیگنال‌ها به قسمت‌هایی از هدف برخورد می‌کنند و منعکس می‌شوند، سپس توسط یک تشخیص‌دهنده حساس این سیگنال‌های برگشتی شناسایی می‌شوند که اگر از یک آنتن باریک استفاده شده باشد، جهت هدف را می‌توان با موقعیت زاویه‌ای دقیق به دست آورد. فاصله هدف هم با استفاده از زمان ارسال سیگنال و برگشت آن اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۱) سیستم یک رادار ساده را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱) اگر توان سیگنال ارسالی از آنتن فرستنده برابر با P_t باشد و بهره آنتن برابر با G باشد آن‌وقت توان سیگنالی که روی هدف احساس می‌شود را با S_t نشان می‌دهند که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$S_t = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (21)$$

در این رابطه R فاصله هدف تا آنتن رادار است. فرض می‌کنیم که هدف در راستای جهت پرتوی سیگنال‌های آنتن است. هدف، سیگنال‌های توان ورودی را در جهت‌های مختلف پراکنده می‌کند. نسبت توان پراکنده‌شده به چگالی توان ورودی روی هدف با عنوان سطح مقطع راداری بیان می‌گردد؛ که با σ نشان داده می‌شود و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{P_s}{S_t} \quad (22)$$

P_s برابر با تمام توان پراکنده‌شده و S_t چگالی توان ورودی روی هدف^{۱۱} است. σ به زاویه^{۱۲} و پلاریزاسیون^{۱۳} موج ورودی و موج بازتابی بستگی دارد. منظور از سطح مقطع راداری یعنی میزان توانایی یک جسم برای بازگشت سیگنال‌هایی که از سمت رادار دریافت کرده است. حال برای اینکه یک جسم در سیستم راداری مشاهده نشود یا به اصطلاح رادارگریز باشد باید بتوان سطح مقطع راداری را کاهش داد که سطح مقطع راداری به هندسه فیزیکی جسم و شکل خارجی آن،

مواد نانومتری به دلیل ابعاد بسیار کوچک و سطح بسیار بالا در مقایسه با مواد معمولی در سطح بارگذاری کمتر باعث بهبود خواص موردنظر شده و نانو کامپوزیت‌ها جایگزین خوبی برای کامپوزیت‌های معمولی هستند؛ چراکه کارایی بهتر و وزن کمتری دارند. محصولات تهیه‌شده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری قابلیت استفاده در صنایع شیمیایی، خودروسازی، ساختمان، نظامی، پزشکی، لوازم خانگی، ورزشی، کشاورزی و الکترونیکی را داشته و استفاده از آن‌ها در این صنایع کاهش مصرف سوخت و انرژی، افزایش مقاومت و ایمنی در برابر زلزله و آتش‌سوزی، افزایش عمر سازه‌ها، کاهش خسارات ناشی از زمان نگهداری مواد غذایی و محصولات کشاورزی، کاهش خسارات ناشی از خوردگی و به‌طور خلاصه، استفاده بهینه از منابع موجود را می‌تواند به همراه داشته باشد. در مقابل سامانه‌های معمول که استحکام کمی دارند، نانو کامپوزیت‌های پلیمری با اجزای در حد چند نانومتر استحکامی میلیون‌ها بار بزرگ‌تر از موی انسان نشان می‌دهند. توزیع یکنواخت این ذرات پرکننده در حد نانومتر نسبت سطح به حجم بسیار بزرگی بین جزء نانو و پلیمر میزبان ایجاد می‌کنند. بر طبق ساختار نانومتری نانوکامپوزیت‌ها، ترکیب جدیدی از ویژگی‌ها برای گسترش مواد پیشرفته شامل مواد پلیمری با شفافیت بالا، مقاومت حرارتی، مقاومت الکتریکی، مقاومت تابشی، ویژگی‌های دی‌الکتریکی، اپتیکی، مغناطیسی و پایداری اندازه ایجاد می‌شود [۱۲، ۱۳].

نانو مواد دارای مشکلاتی مانند فعالیت سطحی بالا، تجمع و اثر سطحی نیز می‌باشند که یافتن راه‌حلی برای حل این مشکلات ضروری است. برای این منظور برخی روش‌ها از قبیل پلیمریزاسیون در محل در حضور ذرات، پخش ذرات در ماتریس پلیمری برای جلوگیری از متراکم شدن آن‌ها و عامل‌دار کردن به کار گرفته شده است [۶].

برای مثال نانو ساختارهای کربن نانوتیوب، پلی آنیلین، اکسید آهن و نیکل از جمله موادی هستند که به علت رسانایی بالا و خواص مغناطیسی مناسب، قابلیت استفاده در رادار گریزی، فناوری اختفا و ساخت پوشش‌های عایق امواج الکترومغناطیس را دارند و تهیه نانو کامپوزیت آن‌ها با پلیمری همچون پلی آکرلیک که قابلیت مقاومت آب و هوایی خوب، وضوح بالا، مقاومت شیمیایی خوب، مقاومت ضربه-ای بالا و انعطاف‌پذیری خوبی را دارا است، مناسب است [۱۴-۱۷].

۹- عایق سازی امواج الکترومغناطیس

به‌طور کلی موج الکترومغناطیسی فرودی به یک ماده، تحت سه فرآیند انعکاس، جذب و عبور قرار می‌گیرد. جذب موج الکترومغناطیس فرآیندی است که در آن انرژی موج الکترومغناطیس تخلیه می‌شود و سپس به انرژی دیگری مانند گرمایی تبدیل می‌گردد. توانایی عایق سازی و تضعیف میدان‌های الکترومغناطیسی برای کنترل انرژی تابش آن‌ها، به‌عنوان عایق سازی مؤثر^{۱۷} معرفی شده که واحد آن دسی‌بل^{۱۸} (dB) است. عایق سازی مؤثر به‌صورت نسبت دو مقدار از موج

تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به گرما جایگزین می‌گردد. مکانیسم اتلافی ممکن است کربن یا مواد دی‌الکتریک دیگر با ضرایب انکسار متفاوت باشد. آهن و ترکیبات آهن مانند کربونیل آهن و اکسید آهن (فریت) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در جذب رادار مؤثر می‌باشند. پودر فلزات و پلیمرهای رسانا نیز از مواد جاذب رادار به شمار می‌آیند [۲]. برای استفاده از مواد جاذب رادار ساخت کامپوزیتی از مواد مختلف راهگشاست.

۷- کامپوزیت

کامپوزیت‌ها موادی چندجزیی هستند که اجزای مختلف خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده ولی در مجموع، کامپوزیت خواص بهتری از هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده خود دارد. عمومی‌ترین کامپوزیت‌های ساخته‌شده براساس نوع زمینه را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد [۶]:

- کامپوزیت‌های زمینه فلزی
- کامپوزیت‌های زمینه پلیمری
- کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

۸- کامپوزیت‌های پلیمری

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری شامل زمینه‌ای از جنس پلیمرند که با فاز توزیع‌شده تقویت‌کننده آمیخته است [۷]. پلیمرها درشت ملکولهای آلی هستند که کاربردهای فراوانی از جمله در ساخت حسگر، میکرو آینه، سلول فتو ولتاییک و دیود دارند [۸-۱۰]. در کامپوزیت‌های پلیمری حداقل دو جزء مشاهده می‌شود:

- فاز تقویت‌کننده که درون ماتریس پخش شده است.
- فاز ماتریس که فاز دیگر را در بر می‌گیرد و یک پلیمر گرماسخت یا گرمانرم است که گاهی قبل از سخت شدن آن را رزین می‌نامند.

خواص کامپوزیت‌ها به عوامل مختلفی از قبیل نوع مواد تشکیل‌دهنده و ترکیب درصد آن‌ها، شکل و آرایش تقویت‌کننده و اتصال دو جزء به یکدیگر بستگی دارد. ماتریس پلیمری عملکرد بسیار مهمی در کامپوزیت دارد. اولاً به‌عنوان یک چسب فاز تقویت‌کننده را نگه می‌دارد. دوماً، ماتریس تحت بار اعمالی تغییر شکل می‌دهد و تنش را به فاز تقویت‌کننده محکم و سفت منتقل می‌کند. سوماً، رفتار پلاستیک ماتریس پلیمری، انرژی را جذب کرده، موجب کاهش تمرکز تنش می‌شود. بحث در مورد مصادیق ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده در کامپوزیت‌ها به معنای بحث در مورد تمام پلاستیک‌های تجاری موجود است [۶].

۸-۱- نانو کامپوزیت‌های پلیمری

نانو مواد به دلیل اندازه کوچک، شکل ذاتی و سطح بزرگشان خواص بسیار بهتری نسبت به مواد در اندازه بزرگ‌تر نشان می‌دهند [۱۱].

$$B_{dB} = 20 \cdot \log \left| 1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} \cdot e^{-2t/\delta} \right| \quad (28)$$

که رابطه‌ی کلی برای عایق الکترومغناطیس مؤثر، برابر مجموع جذب، بازتاب، بازتاب‌های چندگانه است:

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + B_{dB} \quad (29)$$

۱۰- پارامترهای مؤثر در جذب

نفوذپذیری الکتریکی^{۲۵}، نفوذپذیری مغناطیسی، هدایت الکتریکی، اندازه نانو مواد، ساختار کامپوزیت، ضخامت کامپوزیت از عوامل مؤثر در جذب هستند [۲۲]. برای دستیابی به یک جاذب امواج الکترومغناطیسی در ناحیه میکروویو، نیاز به افزایش رسانایی سطحی یا خاصیت مغناطیسی و یا ترکیبی از این دو ویژگی در سطح پوشش موردنظر، برای جذب امواج میکروویو است. موادی از قبیل کربن (به شکل توده، گرافیت و نانولوله) و پلیمرهای هادی مانند پلی پیرول و پلی آنیلین به‌عنوان مواد افزاینده رسانایی و تلفات اهمی و ترکیبات مغناطیسی از قبیل فریت های آهن، نیکل، روی و منیزیم و کربونیل آهن و مشابه آن به‌عنوان مواد افزاینده خاصیت تلفات مغناطیسی به کار می‌رود [۲۲-۲۴].

وقتی که یک موج الکترومغناطیس به یک کامپوزیت برخورد می‌کند، تلفات مغناطیسی و تلفات دی‌الکتریک را احساس می‌کند [۲۲]. در ادامه به بررسی این تلفات می‌پردازیم.

۱۰-۱- تلفات مغناطیسی

ماده مغناطیسی در اثر برخورد با موج الکترومغناطیسی سه نوع اتلاف انرژی ایجاد می‌کند که برابر هستند با اتلاف جریان گردابی، اتلاف هیستریزیس و اتلاف باقی‌مانده.

اتلاف مغناطیسی در فرکانس پایین و چگالی شار مغناطیسی پایین، توسط معادله‌ی لگ^{۲۶} به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{2\pi t g \delta_m}{\mu} = ef + aB + c \quad (30)$$

که در آن $t, g, \delta_m, \mu, e, a, B, c$ به ترتیب تانژانت تلفات مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی، ضریب اتلاف جریان گردابی، ضریب هیستریزیس مغناطیسی، اتلاف باقی‌مانده می‌باشند [۲۲].

۱۰-۱-۱- اتلاف جریان گردابی^{۲۷}

اگر یک ماده‌ی رسانا در یک میدان مغناطیسی متناوب قرار گیرد، جریان القایی در داخل ماده ایجاد خواهد شد و در نتیجه این ماده رسانا انرژی میدان مغناطیسی را تحلیل خواهد داد که به آن اتلاف جریان گردابی می‌گویند. اتلاف جریان گردابی در فرکانس پایین و

الکترومغناطیس، قبل (رابطه ۱) و بعد از (رابطه ۲) از فرود آمدن روی عایق تعریف می‌شود که به‌صورت زیر نشان داده شده است:

$$SE_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (23)$$

$$SE_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (24)$$

بازتاب^{۱۹}، جذب^{۲۰}، بازتاب چندگانه^{۲۱} مکانیسم‌های عایق امواج الکترومغناطیس هستند، شکل (۲) مکانیسم‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد.

مواد رسانا به علت داشتن حامل‌های بار^{۲۲} (الکترون‌ها) بهترین گزینه برای بازتاب در عایق سازی امواج الکترومغناطیس هستند. این حامل‌ها امپدانس لازم بین عایق و موج خلأ را متفاوت می‌کنند. به خاطر همین عدم تطبیق امپدانس، بیشتر موج فرودی بازتاب می‌شود. اگر T_1 و T_2 ضریب انتقال در هوا و عایق باشند معادله‌ی (۲۰) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$R_{dB} = -20 \cdot \log |T_1 T_2| = 20 \cdot \log \frac{(1+k)^2}{4k} \quad (25)$$

که $k = Z_0 / Z_s$ و Z_s امپدانس عایق است [۱۸]. جذب مکانیسم دیگری از عایق سازی هست که نیازمند دوقطبی^{۲۳} الکتریکی و مغناطیسی درون ساختار عایق است [۱۹]. فاصله‌ای به‌عنوان عمق پوسته^{۲۴} تعریف می‌شود که این فاصله از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma_s \mu_s \mu_0}} \quad (26)$$

که f فرکانس موج، σ_s هدایت الکتریکی کامپوزیت، μ_s ضریب تراوایی ماده، μ_0 ضریب تراوایی خلأ است. همان‌طور که از رابطه‌ی (۲۶) مشخص است، عمق پوسته با افزایش تراوایی ماده و هدایت الکتریکی، کاهش پیدا می‌کند [۱۸، ۲۱، ۲۰]. با توجه به عمق پوسته، تلفات جذب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log(e^{t/\delta}) = 8.686 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (27)$$

که t ضخامت عایق برحسب متر است. تلفات بازتاب‌های چندگانه در داخل ساختار عایق ایجاد می‌شوند و عامل ایجادکننده‌ی آن مواد داخل عایق هستند. تلفات بازتاب‌های چندگانه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

۱۰-۲-۱- تلفات دی‌الکتریکی^{۳۷}

وقتی که یک موج الکترومغناطیسی به یک ماده دی‌الکتریک^{۳۸} برخورد می‌کند، انرژی الکتریکی موج الکترومغناطیس توسط ماده تلف شده و به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود که به این انرژی تلف شده، اتلاف دی‌الکتریک می‌گویند. مکانیسم تلفات دی‌الکتریک شامل اتلاف رسانایی، اتلاف آسایش دی‌الکتریک، اتلاف رزونانسی است.

۱۰-۲-۱-۱- اتلاف رسانایی^{۳۹}

وقتی که میدان الکتریکی متناوب با مواد جاذب موج که خاصیت رسانایی معین دارند، برخورد می‌کند باعث ایجاد جریان می‌شود که این جریان، انرژی الکتریکی را با تبدیل به انرژی گرمایی تلف می‌کند. در نتیجه اتلاف رسانایی با رسانایی الکتریکی محاسبه می‌شود که اگر اتلاف رسانایی را با $tg \delta_c$ نشان دهیم داریم:

$$tg \delta_c = 1.8 \times 10^{10} \frac{\sigma}{f \epsilon_r} \quad (33)$$

که f ، ϵ_r ، σ به ترتیب رسانایی الکتریکی و گذردهی الکتریکی و فرکانس هستند [۲۲].

۱۰-۲-۲- اتلاف آسایش دی‌الکتریک^{۴۰}

مواد تحت تأثیر میدان الکتریکی قطبیده می‌شوند. اگر تغییر قطبش آهسته‌تر از میدان الکتریکی باشد، اتلاف زمان آسایش ایجاد می‌شود. قطبش‌ها اساساً شامل قطبش یونی گرمایی^{۴۱}، قطبش چرخش دوقطبی^{۴۲}، قطبش جابجایی الکترونیکی^{۴۳} و قطبش یونی^{۴۴} می‌باشند. زمان جابجایی الکترونیکی و قطبش یونی خیلی کوتاه و در حدود $10^{-14} - 10^{-15} s$ است، بنابراین، این قطبش‌ها فقط در فرکانس‌های خیلی زیاد تلفات انرژی دارند. اگرچه برای قطبش یونی گرمایی و قطبش چرخش دوقطبی این زمان در حدود $10^{-8} - 10^{-2} s$ است. در نتیجه در فرکانس‌های بالا قطبش یونی گرمایی و چرخش دوقطبی نقش اساسی را در اتلاف آسایش دارند. اگر اتلاف آسایش دی‌الکتریک را با $tg \delta_{rel}$ نشان دهیم آن وقت داریم:

$$tg \delta_{rel} = \frac{\epsilon'' r(\omega)}{\epsilon' r(\omega)} = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})\omega}{\epsilon_{rs} + \epsilon_{r\infty}\omega^2 \tau^2} \quad (34)$$

که در آن ϵ_{rs} ، $\epsilon_{r\infty}$ و τ به ترتیب ثابت دی‌الکتریک در فرکانس نزدیک صفر و فرکانس بی‌نهایت و زمان آسایش را نشان می‌دهند [۲۲].

۱۰-۲-۳- اتلاف رزونانسی^{۴۵}

این اتلاف از اثر رزونانس ارتعاش اتم‌ها، یون‌ها و الکترون‌های درون ماده جاذب موج است و در محدوده فرکانسی مادون قرمز تا فرابنفش است [۲۲].

چگالی شار مغناطیسی پایین می‌تواند توسط ضریب اتلاف جریان گردابی e بیان شود. در یک ورقه با ضخامت d و رسانایی الکتریکی σ ، ضریب اتلاف جریان گردابی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$e = \frac{4\pi^2 \mu_0 d^2 \sigma}{3} \quad (31)$$

طبق این معادله، به منظور افزایش اتلاف جریان گردابی، ماده باید دارای ضخامت و رسانایی الکتریکی بزرگ باشد. اگرچه ماده با رسانایی الکتریکی بالا در فرکانس‌های بالا، تراوایی مغناطیسی ناپایدار دارد و باعث ایجاد محدودیت در کاربردهای فرکانس بالا خواهد شد. با اینکه از جریان گردابی در فرکانس‌های پایین استفاده می‌شود ولی وابستگی d و σ در تلفات جریان گردابی، در فرکانس‌های بالا مشابه فرکانس‌های پایین بوده است. عواملی از قبیل جهت‌گیری، مورفولوژی مواد و سایز ذرات می‌توانند روی جریان گردابی اثرگذار باشند [۲۲].

۱۰-۲-۱-۱- اتلاف هیستریزیس مغناطیسی^{۲۸}

اتلاف هیستریزیس مغناطیسی توسط حرکت برگشت‌ناپذیر حوزه‌ها^{۲۹} و چرخش ممان مغناطیسی ایجاد می‌شود. ضریب هیستریزیس مغناطیسی در چگالی شار مغناطیسی پایین از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$a = \frac{8b}{3\mu_0\mu^3} \quad (32)$$

که در آن b ، μ_0 و μ به ترتیب ضریب ریلی^{۳۰}، تراوایی مغناطیسی خلأ و تراوایی مغناطیسی ماده هستند. همان‌طور که از رابطه‌ی (۳۲) مشخص است، اتلاف هیستریزیس مغناطیسی به ضریب ریلی و تراوایی مغناطیسی وابسته است [۲۲].

۱۰-۳-۱- اتلاف باقی‌مانده^{۳۱}

به اتلاfi، به جز اتلاف هیستریزیس مغناطیسی و اتلاف جریان گردابی، اتلاف باقی‌مانده گفته می‌شود. اتلاف باقی‌مانده عمدتاً توسط از دست دادن اثرات مغناطیسی، از جمله نوسان حرارتی و یا هیستریزیس برخی از الکترون‌ها و حرکت یون‌ها به سمت تعادل، توسط نفوذ میدان مغناطیسی است. با استفاده از دامنه میدان مغناطیسی متناوب و زمان آسایش ماده^{۳۲}، می‌توان این نوع تلفات را تخمین زد. در فرکانس‌های بالا تلفات باقی‌مانده توسط رزونانس اندازه^{۳۳}، رزونانس فرومغناطیسی^{۳۴}، رزونانس طبیعی^{۳۵} و رزونانس دیواره‌های حوزه‌ها^{۳۶} ایجاد می‌شود. با کنترل موارد ذکر شده می‌توان به تلفات مغناطیسی موردنظر دست یافت [۲۲].

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad (39)$$

$$T = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2 \quad (40)$$

$$A = 1 - R - T \quad (41)$$

با استفاده از پارامترهای S می‌توان تراوایی مختلط مغناطیسی و تراوایی مختلط الکتریکی را به دست آورد که برای این کار باید از روش Nicholson-Ross-Weir استفاده شود که برای محاسبه آن نیازمند نرم‌افزار کامپیوتری هستیم [۳۰، ۳۱].

۱۲- نتیجه‌گیری

به جهت رشد آلودگی‌های مغناطیسی موجود در محیط اطراف زندگی بشر، یافتن روش‌هایی برای کاهش این آلودگی‌ها ضروری است. سپر سازی در برابر امواج مغناطیسی آلاینده یکی از روش‌های مؤثر است. هدف از تهیه جاذب امواج الکترومغناطیس تولید کامپوزیت و یا پوششی است که توانایی جذب امواج برای رادار گریزی در صنایع نظامی، محافظت بافت‌های زنده در برابر امواج الکترومغناطیس و محافظت از دستگاه‌های الکترونیکی و مخابراتی در برابر امواج مزاحم را داشته باشد تا بتوان از آن به‌عنوان عایق امواج الکترومغناطیس استفاده کرد. نانوکامپوزیت‌های پلیمری به دلیل ویژگی‌های مناسب خود گزینه مؤثری برای استفاده در جاذب‌های امواج الکترومغناطیس هستند. در مقاله حاضر به مکانیسم‌ها و عملکردهای این جاذب‌ها پرداخته شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از پشتیبانی مالی دانشگاه تبریز کمال سپاسگزاری را دارند.

جدول (۱): طیف امواج میکروویو [۱]

Approximate Band Designations

Medium frequency	300 kHz-3 MHz
High frequency (HF)	3 MHz-30 MHz
Very high frequency (VHF)	30 MHz-300 MHz
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz-3 GHz
L band	1-2 GHz
S band	2-4 GHz
C band	4-8 GHz
X band	8-12 GHz
Ku band	12-18 GHz
K band	18-26 GHz
Ka band	26-40 GHz
U band	40-60 GHz
V band	50-75 GHz
E band	60-90 GHz
W band	75-110 GHz
F band	90-140 GHz

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش‌های قبلی کامپوزیت مناسب برای عایق سازی در برابر امواج باید ویژگی‌های زیر را دارا باشد:

- پرکننده‌ها باید دارای ضریب مغناطیسی بالایی باشند تا بتوانند تلفات مغناطیسی خوبی داشته باشند.
- پرکننده‌ها باید دارای ضریب الکتریکی بالایی باشند تا بتوانند تلفات الکتریکی بالایی داشته باشند.
- مواد تشکیل دهنده ماتریس، باید مقرون به صرفه، قابل شکل دهی و در برابر شرایط محیطی مقاوم باشند [۲۵].

۱۱- پارامترهای پراکندگی S11 و S21 و روابط حاکم بر آنها

با توجه به اینکه عایق سازی در برابر امواج الکترومغناطیس با استفاده از دستگاهی به اسم vector network analyzer مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و این دستگاه پارامترهای پراکندگی S₁₁ و S₂₁ را اندازه‌گیری می‌کند که S₁₁ به‌عنوان ضریب بازتاب^{۴۶} و S₂₁ به‌عنوان ضریب عبور^{۴۷} شناخته می‌شود، این پارامترها اعدادی بین 0 و 1 هستند که از نتایج اندازه‌گیری دستگاه به دست می‌آیند [۲۶، ۳].

اگر یک موج الکترومغناطیسی در یک کامپوزیت نفوذ کند، کل عایق سازی مؤثری که کامپوزیت احساس می‌کند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$SE_T = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = SE_A + SE_R + SE_M \quad (35)$$

که P_{in} برابر با توان ورودی و P_{out} برابر با توان خروجی از مواد عایق سازی است. SE_T به صورت دسی‌بل^{۴۸} (dB) بیان می‌شود که SE_A برابر با عایق سازی با تلفات جذب است و SE_R برابر با عایق سازی با تلفات بازتاب است و SE_M مربوط به بازتاب‌های درونی مواد داخل عایق است که مقدار آن ضریب مثبت یا منفی در عایق سازی کل دارد که اگر عایق سازی با جذب (SE_A)، بیشتر از 10 dB باشد آن وقت می‌توان از آن صرف نظر کرد [۱۱، ۲۷].

برای محاسبه عایق سازی کل امواج الکترومغناطیس از روابطی که در ادامه داریم استفاده می‌شود [۲۹، ۲۸، ۲۶، ۳، ۱۱].

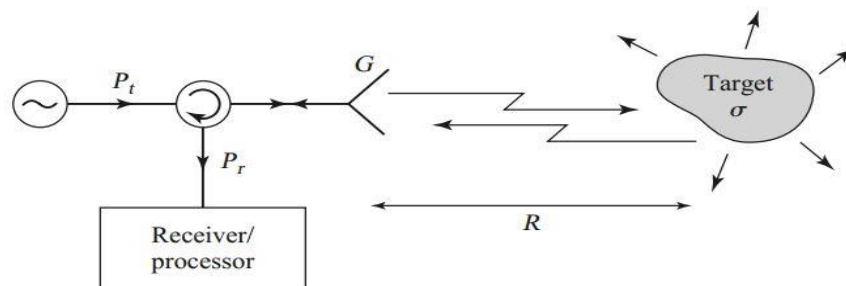
$$SE_T = SE_R + SE_A \quad (36)$$

$$SE_R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (37)$$

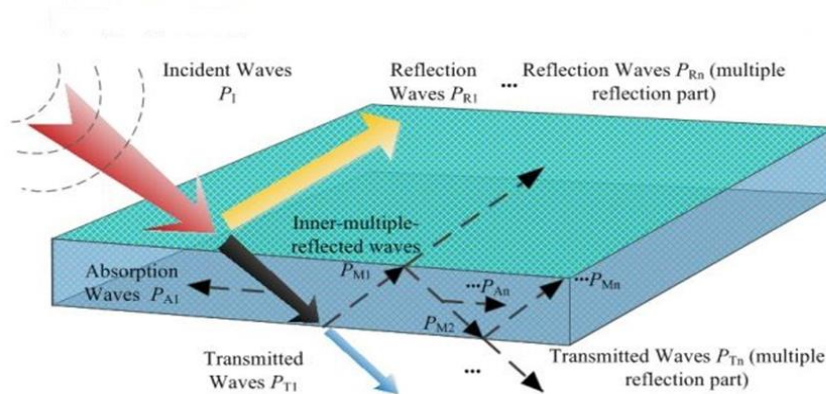
$$SE_A = 10 \log_{10} \left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{12}|^2} \right) \quad (38)$$

جدول (۲): کاربردهای امواج میکروویو [۲]

Band Designation	Frequency Range	General Usage
VHF	50-300 MHz	Very Long-Range Surveillance
UHF	300-1000 MHz	Very Long-Range Surveillance
L	1-2 GHz	Long-Range Surveillance, Enroute Traffic Control
S	2-4 GHz	Moderate Range Surveillance, Terminal Traffic Control, Long-Range Weather
C	4-8 GHz	Long-Range Tracking, Airborne Weather Detection
X	8-12 GHz	Short Range Tracking, Missile Guidance, Mapping, Marine Radar, Airborne Intercept
K _M	12-18 GHz	High Resolution Mapping, Satellite Altimetry
K	18-27 GHz	Little Used (Water Vapor Absorption)
k _a	27-40 GHz	Very High Resolution Mapping, Airport Surveillance
Millimeter	40-100+ GHz	Experimental



شکل (۱): سیستم یک رادار ساده [۱]



شکل (۲): نمایی کلی از عایق امواج الکترومغناطیس [۱۳]

- [1] Pozar, D. M., Microwave Engineering John Wiley & Sons, 2009
- [2] Knott, E. F., Radar Cross Section Measurements Springer Science & Business Media, 2012
- [3] Abbasi, H., M. Antunes, and J.I. Velasco, Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for

- [19] Al-Saleh M. H., Sundararaj, U., "Electromagnetic Interference Shielding Mechanisms of Cnt/Polymer Composites", *Carbon*, 47, 1738-1746, 2009.
- [20] Huo, J., Wang L., Yu, H., "Polymeric Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption", *Journal of materials science*, 44, 3917-3927, 2009.
- [21] Thomassin, J.-M. Jerome, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen I., Detrembleur, C., "Polymer/Carbon Based Composites as Electromagnetic Interference (Emi) Shielding Materials", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74, 211-232, 2013.
- [22] Tong, X. C., *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding* CRC press, 2016.
- [23] Jelmy, E. J., Ramakrishnan S., Kothurkar, N. K., "Emi Shielding and Microwave Absorption Behavior of Au-Mwcnt/Polyaniline Nanocomposites", *Polymers for Advanced Technologies*, 27, 1246-1257, 2016.
- [24] Lu, L., Xing, D., Teh, K. S., Liu, H., Xie, Y., Liu, X., "Structural Effects in a Composite Nonwoven Fabric on Emi Shielding", *Materials & Design*, 120, 354-362, 2017.
- [25] Schulz, R. B., Plantz V., Brush, D., "Shielding Theory and Practice", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 30, 187-201, 1988.
- [26] Kaiser, K. L., *Electromagnetic Shielding* Crc Press, 2005.
- [27] Weir, W. B., "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies", *Proceedings of the IEEE*, 62, 33-36, 1974.
- [28] Jiang, D., et al., *Electromagnetic interference shielding polymers and nanocomposites-a review*. *Polymer Reviews*, 2019. 59(2): p. 2.
- [29] Ma, X., et al., *Porous superhydrophobic polymer/carbon composites for lightweight and self-cleaning EMI shielding application*. *Composites Science and Technology*, 2018. 158: p. 86-9.
- [30] Singh, A.K., et al., *A review of porous lightweight composite materials for electromagnetic interference shielding*. *Composites Part B: Engineering*, 2018. 149: p. 188-197.
- [31] Bagotia, N., V. Choudhary, and D. Sharma, *Synergistic effect of graphene/multiwalled carbon nanotube hybrid fillers on mechanical, electrical and EMI shielding properties of polycarbonate/ethylene methyl acrylate nanocomposites*. *Composites Part B: Engineering*, 2019. 159: p. 378-388.
- [4] Roh, J.-S., Chi, Y.-S., Kang T. J. Nam, S.-w., "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics", *Textile Research Journal*, 78,825-835, 2008
- [5] Joseph, N., Singh, S. K., Sirugudu, R. K., Murthy, V. R. K., Ananthakumar S., Sebastian, M. T., "Effect of Silver Incorporation into PvdF-Barium Titanat Composites for Emi Shielding Applications", *Materials Research Bulletin*, 48, 1681-1687, 2013.
- [6] Nosrati, R., *Surface modification of zinc oxide nanoparticles by conducting polymers and investigation of its photocatalytic and anticorrosion properties*, MSc Thesis, University of Tabriz, September 2011
- [7] Pandey, J. K., Reddy, K. R., Kumar A. P., Singh, R., "An Overview on the Degradability of Polymer Nanocomposites", *Polymer degradation and stability*, 88, 234-250, 2005.
- [8] Esfandiari, M., Asadi, R., Heydari, P., "Design and Fabrication of Deformable Polymer Micromirror for Adaptive Optic Systems", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 15, 117-124, 2018.
- [9] Nasirian, S., Shokravi, M. M., "The Study of Humidity Effect on Carbon Dioxide Gas Sensing Properties of Zinc Oxide Nanowires Assisted by Polyvinyl Alcohol Network at Room Temperature", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 16, 1-7, 2019.
- [10] Olad, A., Nosrati, R., "An Overview on Applications of ZnO Nanostructures in Polymer Industries", *Polymerization*, 5, 33-42, 2015.
- [11] Kang, S.-Z., Wu, T., Li, X., Mu, J., "A Facile Gelatin-Assisted Preparation and Photocatalytic Activity of Zinc Oxide Nanosheets", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 369, 268-271, 2010.
- [12] Wu, D., Wang, X., Song Y., Jin, R., "Nanocomposites of Poly (Vinyl Chloride) and Nanometric Calcium Carbonate Particles: Effects of Chlorinated Polyethylene on Mechanical Properties, Morphology, and Rheology", *Journal of Applied Polymer Science*, 92, 2714-2723, 2004.
- [13] Lü, N., Lü, X., Jin X., Lü, C., "Preparation and Characterization of Uv Curable Zno/Polymer Nanocomposite Films", *Polymer international*, 56, 138-143, 2007.
- [14] Al-Saleh, M. H., Saadeh W. H., Sundararaj, U., "Emi Shielding Effectiveness of Carbon Based Nanostructured Polymeric Materials: A Comparative Study", *Carbon*, 60, 146-156, 2013.
- [15] Lakshmi, K., John, H., Mathew, K., Joseph R., George, K. "Microwave Absorption, Reflection and Emi Shielding of Pu-Pani Composite", *Acta Materialia*, 57, 371-375, 2009.
- [16] Liu, Y., Song, D., Wu, C., Leng, J., "Emi Shielding Performance of Nanocomposites with Mwcnts, Nanosized Fe3o4 and Fe", *Composites Part B: Engineering*, 63, 34-40, 2014.
- [17] Duan, H., Xu, Y., Yan, D.-X., Yang, Y., Zhao G., Liu, Y., "Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composites with Segregated Nickel Conductive Network for Highly Efficient Electromagnetic Interference Shielding", *Materials Letters*, 209, 353-356, 2017.
- [18] Gooch J. W., Daher, J. K., *Electromagnetic Shielding and Corrosion Protection for Aerospace Vehicles* Springer, 2007.

¹ Surface Current
² Permittivity Of Air
³ Permeability Of Air
⁴ Complex Relative Permittivity
⁵ Complex Relative Permeability
⁶ Conductivity Of Material
⁷ Harmonic Field
⁸ Wave Impedance
⁹ Far Field
¹⁰ Radar Cross Section (RCS)
¹¹ Detection
¹² Angle
¹³ Polarization
¹⁴ Shaping
¹⁵ Active Cancellation
¹⁶ Passive Cancellation
¹⁷ Shielding Effectiveness (SE)
¹⁸ Decibel
¹⁹ Reflection
²⁰ Absorption
²¹ Multi Reflection
²² Mobile Charge Carriers
²³ Dipole

-
- ²⁴ Skin Depth
 - ²⁵ Complex Permittivity
 - ²⁶ Legg's Equation
 - ²⁷ Eddy Current Loss
 - ²⁸ Magnetic Hysteresis Loss
 - ²⁹ Domain
 - ³⁰ Rayleigh Constant
 - ³¹ Residual Loss
 - ³² Relaxation Time
 - ³³ Size Resonance
 - ³⁴ Ferromagnetic Resonance
 - ³⁵ Natural Resonance
 - ³⁶ Domain Wall Resonance
 - ³⁷ Dielectric Loss
 - ³⁸ Dielectric Material
 - ³⁹ Conductance Loss
 - ⁴⁰ Dielectric Relaxation Loss
 - ⁴¹ Thermal Ion Polarization
 - ⁴² Dipole Rotation Polarization
 - ⁴³ Electronic Displacement Polarization
 - ⁴⁴ Ion Polarization
 - ⁴⁵ Resonance Loss
 - ⁴⁶ Reflection Coefficient
 - ⁴⁷ Transmission Coefficient
 - ⁴⁸ Decibel