مروری بر انواع جاذب‌های رادار در کامپوزیت‌های پلیمری با تقویت کننده کربنی در بازه‌ی ۱۲ الی ۱۸ گیگاهرتز (Ku)

محمد ملااحمدی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی و علم مواد، گروه سرامیک



مهندس محمد ملا احمدی، نویسنده‌ی مسئول مقاله، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی و علم مواد

m.molaahmadi@chmail.ir

چکیده: یکی از مواد تعیین‌کننده برای بسیاری از شاخه‌های مدرن تکنولوژی، کربن می‌باشد. خواص چندگانهٔ منحصر به فرد کربن سبب گسترش بیش از پیش استفاده از این ماده در بسیاری از کاربردها نظیر الکترونیک شده است. یکی از کاربردهای ویژهٔ کربن در عرصه‌های نظامی، استفاده از این ماده در ساخت مواد جاذب رادار (RAM)[1]، جهت بهبود خاصیت جذب امواج مایکروویو می‌باشد. از جمله پارامترهای موثر در به‌کارگیری مواد جاذب رادار، پارامتر وزن کم و پهنای زیاد جذب می‌باشد؛ به‌طوری‌که با بکارگیری کربن در این مواد جاذب می‌توان به خواص نهایی مطلوبی دست یافت. کامپوزیت‌هایی که در آنها از تقویت‌کننده‌های کربن آن‌هم به صورت ذره در یک زمینهٔ پلیمری استفاده شده است، به مراتب یک انعطاف‌پذیری و کنترل خواص مناسبی را از خود نشان داده و همچنین با تغییر اشکال تقویت‌کننده کربنی (مثل کربن سیاه، الیاف و نانو الیاف و همچنین گرافن) می‌توان خواص کامپوزیت را بهینه کرد. این مقاله یک مقایسه‌ای از عملکرد انواع مختلف زمینه‌های پلیمری و اشکال مختلف تقویت‌کننده کربنی که به عنوان مواد جاذب رادار مورد استفاده قرار گرفته‌اند را ارائه می‌دهد. خواص جذبی این نوع مواد جاذب رادار با تغییر برخی پارامترهای موثر نظیر نوع زمینه پلیمری و یا با تغییر در هندسه، ترکیب، مورفولوژی و کسر حجمی تقویت کننده، قابل تغییر می‌باشد.

کلمات کلیدی: جاذب رادار، کامپوزیت زمینه پلیمری، کربن.

۱- معرفی

۱-۱- مواد کربنی

یکی از فراوان‌ترین عنصرهای موجود در جهان هستی (البته بعد از هیدروژن، هلیوم و اکسیژن) کربن می‌باشد. در طبیعت کربن خالص در اشکال مختلفی از جمله الماس، گرافیت (همچنین کربن سیاه (CB))[2]، گرافن نانولوله‌ها بوده است (شکل ۱). مشخصه‌های ذاتی انتقال بار و فاکتورهایی که تحرک حمل‌کننده‌های بار را محدود می‌سازند، به طور ویژه در بین نانوساختارهای مختلف کربن متفاوت می‌باشند. پیوندهای مابین کربن و دیگر عناصر می‌تواند به راحتی به وسیله واکنش‌های شیمیایی و برهمکنش‌های فیزیکی تغییر کند[۱].

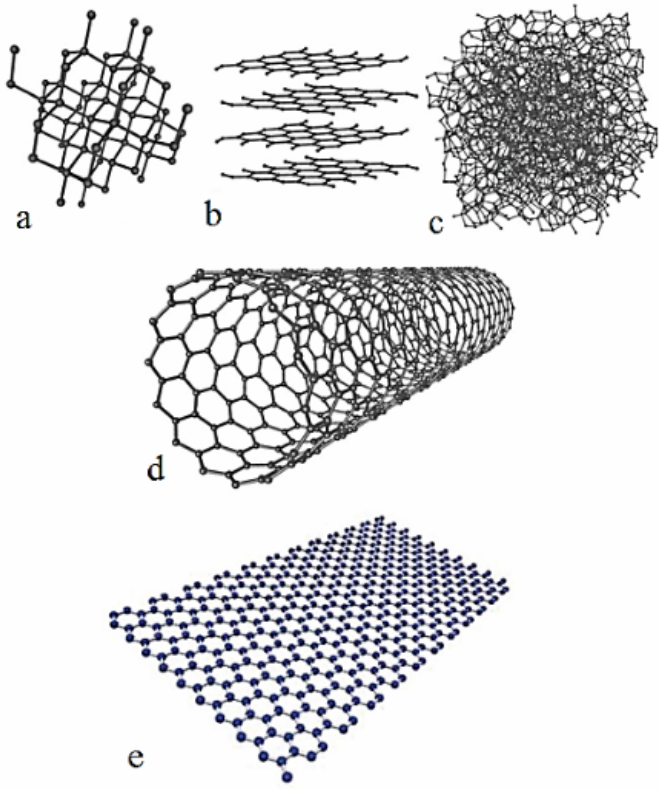
در نظر بسیاری از محققین، نانو الیاف کربنی (CNT)[3] به زنجیره‌های پلیمری که به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار می‌گیرد، شباهت دارد؛ به طوری که هر دو دارای ساختارهایی با پیوندهای کوالانسی، ابعادی مشابه و همچنین دارای انعطاف‌پذیری مکانیکی می‌باشند. با توجه به این امر که تمایل به افزودن مقادیر کمتری از نانوالیاف کربنی به زمینه‌های پلیمری (به دلیل افزایش احتمال آگلومره شدن)، نکته بسیار مهم قابلیت توزیع یکنواخت آنها در بین زمینه می‌باشد. طی دههٔ اخیر، از میان پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزهٔ نانوپلاستیک‌ها، بسیاری از نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پلیمرهایی که از مواد کربنی به عنوان تقویت‌کننده در آنها استفاده

[1] Radar-Absorbing Materials
[2] Carbon Black
[3] Carbon NanoTube

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

می‌شود، دارای یکسری خواص ویژه نظیر بهبود استحکام و پایداری، هدایت الکتریکی، مقاومت در برابر شعله، جذب اشعه ماوراءبنفش و همچنین کاهش نفوذپذیری می‌باشند. علاوه بر خواص مذکور، پیشرفت سریع در حوزه تولید CNTs و گرافن‌های پولکی شکل با مساحت زیاد (در حدود ۱ سانتی‌متر مکعب) سبب شده‌اند تا این ساختارهای کربنی برای کاربردهای جذب امواج مایکروویو مانند پوشش‌های محافظ جهت حفاظت از دستگاه‌های الکترونیکی، کاهش پرتودهی الکترومغناطیس و پنهان‌سازی مواد از دید رادارها، مناسب شوند[۱].



شکل ۱- برخی از آلوتروپی‌های کربن؛ (a) الماس، (b) گرافیت، (c) کربن آمورف، (d) نانولوله کربنی و (e) گرافن [۱].

۱-۲- زمینه پلیمری

مطالعهٔ خواص الکترومغناطیسی مجموعه‌ای از ذرات پرکننده تعبیه شده و نهفته در یک ماتریس پلیمری، مستلزم تعیین خواص ذاتی الکترومغناطیسی ذرات و نیز نوع و قدرت برهم‌کنش‌های بین‌ذره‌ای، نظیر برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی بُرد بلند، خوشه‌بندی[۱]، و برهم‌کنش‌های ماتریس-ذره مانند جذب سطحی زنجیره چندتماسه[۲] به سطح پرکننده می‌باشد. به خوبی ثابت شده است که ناهمگنی‌هایی نظیر خوشه‌های ذرات پرکننده، پدیده‌های قطبیدگی[۳] و وابستگی بسامد گذردهی موثر[۴] را بوجود می‌آورند[۲]. با این‌حال، شناخت نحوهٔ توزیع الکترون‌ها در این کلوخه‌های پرکننده، یک مساله حل نشده معوقه در مزوسکوپی‌های مواد بی‌نظم باقی مانده است، و اطلاع از مناسب‌ترین چارچوب نظری برای شناخت این ترکیبات را دشوار می‌نماید، به عنوان مثال تعیین محل توسط بی‌نظمی، یک علت رایج از رفتار عایق‌بندی در سیستم‌های ماده چگالیده[۵] می‌باشد. در میان انواع گستردهٔ پلیمرهای مناسب برای جاسازی ذرات کربنی برای کاربردهای MA[۶]، رزین‌های اپوکسی، کاندیداهای خوبی بواسطهٔ هزینهٔ پایین خود، سهولت اختلاط با انواع مختلف پرکننده‌ها، مقاومت در برابر تخریب نوری اکسیداتیو[۷]، و پایداری در

[1] Clustering
[2] Multicontact chain adsorption
[3] Polarization
[4] Effective permittivity
[5] Condensed matter systems
[6] Microwave absorption
[7] Oxidative photodegradation

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

برابر نور خورشید می‌باشند. یک زنجیرهٔ پلیمری اپوکسی از پیوندهای متناوب تک کربنی و دوکربنی تشکیل شده است، که شکل‌گیری یک سیستم الکترونی غیرمستقر[1] مکانی را میسر می‌نمایند. این توزیع الکترونی قویاً متاثر از جذب سطحی زنجیره انتخابی بر کلوخه‌های کربن سیاه (CB) در ارائه جایگاه‌های تله‌گذاری بار می‌باشد[۲ و ۳]. این پدیده پیش از این به صورت آزمایشگاهی در زمینه پلیمرهای پرکننده کربن سیاه بررسی و مطالعه شده است[۴]. ضریب هدایت این سیستم‌ها به دو نوع حامل مشخص درون کلوخ‌ها و آگلومره‌های کربن سیاه وابسته است. این جدایش حامل‌ها اخیراً توسط Brosseau و همکارانش برمبنای آزمایشات تشدید اسپینی الکترون[2] پیش‌بینی شده است. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که اکثریت حامل‌ها محدود به سطوح کلوخه‌ها و آگلومره‌ها می‌باشند. تعیین محل توسط بی‌نظمی، یک علت رایج از رفتار عایق‌کنندگی در این سیستم‌ها می‌باشد. اطلاع از نحوه تاثیرات کلوخه‌ای شدن ذرات پرکننده در ایجاد ریزساختارهایی با ساختارهای چندمقیاسه و سلسله مراتبی تشکیل شده هنگام آغشته شدن ذرات پرکننده در محیط سیال مختلط توسط زنجیره‌های پلیمری، مطلوب خواهد بود. محوریت این مسئله در مقاومت جاذبهٔ واندروالس در بین ذرات قرار دارد. با تماس آنها با یکدیگر، خوشه‌های نامنظمی تشکیل می شوند که مورفولوژی (ریخت شناسی) آنها توسط سینتیک کلوخه‌ای شدن تعیین شده است [۱]. نکته مهم دیگر نحوهٔ تاثیرگذاری کلوخه‌ای شدن و آگلومره‌شدن ذرات پرکننده بر روی ضریب هدایت‌پذیری و سازوکارهای قطبیدگی می‌باشد. مشخصه‌سازی و توصیف تجربی قطبیدگی و هدایت خوشه‌های ذرات پرکننده، یک کار غیربدیهی است. تعیین تجربی ساختار تفصیلی سه بعدی این فاز پرکننده می‌تواند از آن جهت پیچیده باشد که مستلزم یک آنالیز توموگرافی دشوار است و اغلب در تفکیک‌پذیری یا وضوح فضایی[3] محدود شده است. اکثر داده‌های موجود یا بسیار محدود هستند یا اینکه در سیستم‌های بسیار رقیق[4] انجام می‌شود که در آن برهم‌کنش دوقطبی میانگین، بسیار ضعیف است. به‌علاوه، بیشتر تحلیل‌های معمولی، فاکتورهای محدودیت فضایی را درنظر نمی‌گیرند. در این رابطه، اطلاعات مهم ارتباط الکتریکی در بین کلوخه‌های پرکننده می‌تواند با استفاده از پروب‌های محلی مانند میکروسکوپ نیروی الکتریکی، میکروسکوپ پروب ظرفیت خازنی، یا میکروسکوپ نیروی اتمی بدست آید[۱].

۱-۳- مقدمه‌ای بر جاذب‌های مایکروویو

تاحد زیادی، تلاش‌های نظری و تجربی طراحی شده برای ارائه جاذب‌های مایکروویو با دو مشخصات مهم از خواص الکترومغناطیسی آنها همراه است. اولی مبتنی بر افزایش اتلاف مغناطیسی[5]، مثلاً، بواسطه پدیده‌های تشدید (رزونانس) در ناحیه بسامد بالاتر (بالای ۳۰۰ مگاهرتز) می‌باشد. به علاوه، استدلال شده است که مشخصه دوم به افزایش اتلاف دی‌الکتریک ارتباط داده شده است. اتلاف مغناطیسی فریت‌های مخلوط یا فریت‌های اسپینلی[6] در مطابقت با محدودهٔ اسنوک[7] کوچک شده و لذا این مواد در محدودهٔ بسامد گیگاهرتز کافی نمی‌باشند. با این وجود، پژوهش قابل ملاحظه‌ای به توسعهٔ محیط‌های کامپوزیتی مصنوعی با استفاده از طیف گستردهٔ پلیمرهای پرشده با هگزافریت‌های[8] نوع M دارای میدان ناهمسانگرد تنظیم‌پذیر[9] بزرگ اختصاص داده‌شده است[۵ و ۶]. پیشرفت‌هایی در تکنولوژی فریت، برای آزمایش‌کاران، کنترل بی سابقه بر روی مشخصات تشدید ژیرومغناطیسی[10] برای بسامدهای انتخابی یا بر روی یک محدودهٔ بسامد باریک ارائه داده‌اند و ساخت جاذب‌های رادار[11] را هموار نموده‌اند[۷]. بسیاری از آزمایشات و شبیه‌سازی‌های اخیر رفتار نانوذرات فرومغناطیسی[12] را در ترکیب با یک ماده ماتریس دی الکتریک برای MA بررسی نموده‌اند[۸ و ۹]. همچنین MA در زمینه پولک‌های آلومینیومی (Al) و پلیمرهای پرشده CB مورد بحث و بررسی قرار گرفته است[۱۰]. تغییرات محتوای اجزای سازنده آلومینیوم و کربن سیاه (CB)، سبب می‌شود که بخش‌های حقیقی و موهومی گذردهی مؤثر کامپوزیت بطورمستقل با بعضی از الزامات جذب در یک بسامد مشخص، منطبق شوند. یکی از

[1] Delocalized electron
[2] Electron spin resonance
[3] Spatial resolution
[4] Diluted systems
[5] Magnetic losses
[6] Spinel ferrites
[7] Snoek's limit
[8] Hexaferrites
[9] Tunable anisotropy field
[10] Gyromagnetic resonance
[11] Radar absorbers
[12] Ferromagnetic nanoparticles

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

مزیت‌های قابل‌ملاحظهٔ این کامپوزیت‌های پلیمری (وزن سبک) آن است که بسته به افزودن ذرات پرکننده- فرآیند اختلاط و توسط تنظیم ماهیت و هندسهٔ ذرات پرکننده، آنها درجات آزادی متعددی برای تنظیم حالت کلوخه‌ای شدن ذرات و گذردهی موثر کلی را ارائه می‌دهند. یک تاریخچه طولانی برای پژوهش در مورد جاذب‌های مبتنی بر کربن وجود داشته است[۱۱]. اولین کاربرد ذرات کربن درون جاذب به سال ۱۹۳۶ برمی‌گردد که در آن زمان یک جاذب براساس کربن سیاه و اکسید تیتانیوم (TiO_2) در هلند ثبت (اختراع) شده بود[۱۲]. در طول جنگ جهانی دوم، ایالات متحده یک مادهٔ جاذب موسوم به رنگ ضد تابش هالپرن (HARP)[1] را براساس لاستیک پرشده با کربن سیاه و پولک‌های آلومینیومی طراحی نمودند. سپس این ماده بطور موفقیت‌آمیز در وسایل هوابرد و دریابرد برای جذب رادار با یک جذب ۱۵-۲۰ دسی بل در باند X پیاده‌سازی شده است[۱۳ و ۱۴]. جاذب‌های پهن‌باند توجه گسترده‌ای در دوره پس از جنگ جهانی دوم دریافت نموده است. پلاستر و گرافیت بارگذاری شده کربنی، در میان بیشترین مواد جذب کننده بررسی شده قرار داشتند. در دهه ۱۹۵۰، جاذب‌های کربنی برای کاربرد تجاری مورد توجه قرار گرفتند. بعنوان مثال، Spongex ساخته شده از مو حیوانی پوشش داده شده کربنی، توسعه داده شده توسط شرکت محصولات اسفنج، قادر به ارائه میرایی (تضعیف) ۲۰ دسی بل در محدوده بسامد ۲/۴ الی ۱۰ گیگاهرتز با ضخامت ۵۰٫۸ میلی‌متری و فرود نرمال می‌باشد. با توسعه جاذب‌هایی با ساختارهای ویژه در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، کربن ذره‌ای یا الیافی، در میان سایر مواد، برای پرکردن یا پوشش بر روی ساختارهای شبکه‌ای مانند، ساختارهای بافتی[2]، یا ساختارهای لانه زنبوری به کاربرده شدند[۱۵]. کربن سیاه و گرافیک، کاندیداهای جذب‌کنندگی مناسبی تا کشف نانولوله‌های کربنی (CNTs) در دهه ۱۹۹۰ باقی ماندند که برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی بالقوه از جمله انیدریک مالئیک MA مورد بهره‌برداری قرار گرفتند[۱۶ و ۱۷]. با شروع این هزاره، دیگر اشکال جاذب‌های کربنی با مشخصات جذب خوب، بواسطه پیشرفت‌ها در تکنیک‌های سنتز و رویکردهای طراحی بهینه‌سازی شده، نمایان گشته‌اند[۱۸ و ۱۹]. اخیراً، گرافن به خانواده کربن برای کاربردهای MA پیوسته است[۲۰].

مشخصه‌سازی جاذب‌ها می‌تواند از طریق روش‌های اندازه‌گیری استاندارد، یعنی اندازه‌گیری مستقیم بازتاب یا انعکاس در فضای آزاد با عبور حذف شده توسط یک سوبسترای فلزی متصل به جاذب‌ها، یا اندازه‌گیری غیرمستقیم پارامترهای الکترومغناطیسی آنها انجام شود. الزامات اصلی برای جاذب‌ها به شرح زیر می‌باشد: (۱) آنها بایستی بازتاب سطح برجسته (پیشانی)[3] و تطبیق امپدانس در هوا برای فصل مشترک جاذب را به حداقل برسانند، (۲) آنها بایستی جذب امواج الکترومغناطیسی را از طریق مقادیر بالای دی الکتریک و اتلاف مغناطیسی را افزایش دهند، (۳) انتظار می‌رود که در یک طیف بسامد گسترده به کاربرده شوند و (۴) نیازی به استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی ندارند[۲۱]. مواد جاذب مایکروویو، از جمله صفحهٔ سالیسبوری، جاذب‌های جامان، لایه‌های پلیمری حامل ذرات و رنگ‌ها بطورکلی سیستم‌های غیرفعال (پسیو) هستند، اگرچه کارهایی برای سطوح فعال نظیر سطوح امپدانس متغیر انجام شده‌اند. در دههٔ اخیر، از طریق پیشرفت‌های تکنولوژیکی جدید در نانوپلاستیک‌ها- ادغام پلاستیک‌های سنتی و زمینه در حال توسعهٔ نانوفناوری- بسیاری از نتایج مهیج نشان داده‌اند که پلیمرهای پرشده با مواد کربنی، دارای خواص منحصربه فردی نظیر بهبود مقاومت (استحکام) و دوام‌پذیری، هدایت‌پذیری الکتریکی، مقاومت به شعله، جذب UV و کاهش نفوذپذیری هستند. مواد جاذب عالی علاوه بر اینکه دارای یک MA قوی و پهنای باند جذب گسترده هستند، سبک وزن بوده و دارای ضخامت ریز و مقرون به صرفه می‌باشند[۲۲]. به این دلایل، مواد پلیمری کربنی برای محققین مواد در هدایت تلاش‌های مداوم آنها برای طراحی مواد MA سودمند هستند. از اوایل دهه ۲۰۰۰، شماری از پژوهشگران در دانشگاه و صنعت، به بررسی احتمال درک فناوری‌های وسایل الکترونیکی انعطاف‌پذیر، نظیر مواد نرم با ساختاربندی مصنوعی با خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی قابل تنظیم پرداخته‌اند[۲۳]. تکنولوژی مدار انعطاف‌پذیر، توجه بسیاری را در صنعت الکترونیک برای کاربردهای قابل حمل[4] جلب نموده است زیرا سوبسترای انعطاف‌پذیر قابلیت نوردکاری، خمش و تاخوردگی برای انطباق با یک فضای محدود در هنگام نیاز را دارا است. برای دستیابی به کنترل مورد نیاز برای تکنولوژی، به یک درک کامل‌تری نیاز خواهد بود. یکی از موارد جالب توجه، مشاهدهٔ تأثیرات فیزیکی غیرمنتظره است که با رسیدن اندازه پرکننده های کربنی در ابعاد چند نانومتری نمایان

[1] Halpern anti radiation paint
[2] Knitted structures
[3] Front face reflection
[4] Portable

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

می‌شود. همچنین ماهیت اساسی این مساله، از توجه بالایی برای متخصصان آزمایشگاهی برخوردار است چرا که آنها در تلاش برای جستجوی کاربردپذیری‌های متعدد در نانوساختارها می‌باشند

۱-۴- اهداف

در دنبالهٔ پیشرفت‌های تکنولوژیکی در مقیاس نانو، MA کامپوزیت‌های پلیمری با آلوتروپ‌های مختلف کربنی، علایق پژوهشی قابل ملاحظه‌ای در زمینه بنیادی و هم به عنوان نگرانی جدی در مواد و وسایل نانوالکترونیک را جلب نموده است. با کنترل ناهمگنی‌های ریزساختاری در این کامپوزیت‌ها، پاسخ‌های جذب منحصربه فردی در مقیاس ماکرو می‌تواند بدست آید. این مساله ضرورت توسعهٔ روش‌های ساختار نظام‌مند جهت بهینه‌سازی MA را ایجاد می‌کند. در ادامه، به بررسی خواص MA کامپوزیت‌های پلیمری با ذرات کربنی، از جمله الیاف کربنی (CFs)، کربن سیاه (CB)، گرافن و سایر مواد پایه کربنی می‌پردازیم. تا آنجا که مطلع هستیم، هیچ مقاله مروری در این موضوع موجود نمی‌باشد. ما تلاش نموده‌ایم که نتایج متنوعی را برای درک خوانندگان از دانش فعلی خود، در شرایط تاثیر جزء کربنی در کامپوزیت‌ها بر روی MA ارائه دهیم. بااین‌حال، علی‌رغم منابع تجربی ارزشمند در زمینه MA، سازوکاری که به موجب آن ذرات کربنی مختلف، سبب بازدارندگی یا تعالی MA می‌شوند، تا حد زیادی بدون جواب باقی مانده است [۱].

۱-۵- پوشش‌های جاذب رادار

رادار که به عنوان یک سیستم الکترومغناطیسی برای تشخیص و تعیین موقعیت هدف مورد استفاده قرار گرفته می‌شود، اولین باردر سال ۱۸۸۶ توسط هرتز آلمانی شناسایی شد و بعد از آن از سال ۱۹۳۰ به بعد مورد بهره‌برداری قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در دسته‌بندی انواع رادار، مؤلفه فرکانس می‌باشد. فرکانس‌های مختلف مورد استفاده در انواع رادارها، مطابق با استاندارد IEEE در جدول ۱ نشان داده می‌شوند[۲۴].

جدول ۱- محدوده‌های فرکانسی امواج رادار براساس استاندارد بین‌المللی IEEE [۲۴]

Band Designation	Nominal Frequency Range	Specific Frequency Ranges for Radar based on ITU Assignments in Region 2
HF	3–30 MHz	
VHF	30–300 MHz	138–144 MHz 216–225 MHz
UHF	300–1000 MHz	420–450 MHz 850–942 MHz
L	1–2 GHz	1215–1400 MHz
S	2–4 GHz	2300–2500 MHz 2700–3700 MHz
C	4–8 GHz	5250–5925 MHz
X	8–12 GHz	8500–10,680 MHz
K_u	12–18 GHz	13.4–14.0 GHz 15.7–17.7 GHz
K	18–27 GHz	24.05–24.25 GHz
K_a	27–40 GHz	33.4–36 GHz
V	40–75 GHz	59–64 GHz
W	75–110 GHz	76–81 GHz 92–100 GHz
mm	110–300 GHz	126–142 GHz 144–149 GHz 231–235 GHz 238–248 GHz

*From "IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands," IEEE Std 521–1984.

محدودهٔ کارایی اغلب سیستم‌های راداری بین ۵ MHz تا ۹۵ GHz می‌باشد و هر نوع فرکانس، رفتار و ویژگی‌های متفاوتی به رادار می‌بخشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

۱-۶- RCS (سطح مقطع راداری)

سطح موثر اهداف را به صورت سطح مقطع راداری تعریف می‌کنند. RCS سطح یک کره فلزی است که سیگنال‌های اکو مشابه جسم هدف از خود ساطع می‌کند که با کاهش سطح مقطع راداری می‌توان احتمال شناسایی آن توسط رادار را کاهش داد. عمده‌ترین روش‌ها برای کاهش سطح مقطع راداری عبارتند از:

- تغییر شکل
- استفاده از جاذب امواج راداری
- خنثی کردن غیر فعال امواج
- خنثی کردن فعال امواج

یکی از راه های نامرئی کردن تجهیزات نظامی، استفاده از پوشش‌ها و مواد جاذب هوشمند می‌باشد. این مواد با جذب انرژی رادار توسط مکانیزم‌های مختلف که بستگی به خواص ساختاری آن‌ها دارد، موجب کاهش سطح مقطع می‌شوند. پوشش‌های RCS در محدوده فرکانسی X و Ku (۸ GHz تا ۴۰ GHz) کاربرد دارند. اتلاف انرژی عمدتا از طریق تبدیل انرژی فرکانس رادیویی به گرما محقق می‌شود. مواد جاذب رادار نیز خود به دو دسته (RAS) یا ساختارهای جاذب و (RAM) مواد جاذب تقسیم می‌شوند. از انواع مواد جاذب راداری که امروزه بسیار مورد توجه می‌باشند، مواد کامپوزیتی که شامل فاز ماتریس و تقویت کننده می‌باشند را می‌توان نام برد [۲۵].

در این گزارش به شناسایی پوشش‌های جاذب رادار کامپوزیتی پرداخته می‌شود. مزیت این پوشش‌ها، سبک بودن آن‌ها است که می‌توان به عنوان رنگ نیز برای بدنه جسم مورد نظر به کار گرفته شوند. مهم‌ترین خصوصیاتی که یک پوشش جاذب رادار باید داشته باشد این است که با کمترین ضخامت (۱ تا ۲ میلی متر) در محدوده فرکانسی مد نظر حداکثر تلفات انعکاس را داشته باشد.

یک پوشش جاذب رادار در محدوده فرکانسی X و Ku باید توانایی جذب امواج در کمترین ضخامت را داشته باشد، یا به عبارتی ماده‌ای با کمترین ضریب انعکاس در محدوده وسیع فرکانسی که توانایی تضعیف امواج ماکروویو را داشته باشد. هم چنین باید با کمترین ضخامت و دانسیته پایین، جذب قوی در محدوده جذبی پهن داشته باشد. این نوع از مواد باید توانایی گذردهی الکتریکی (permittivity) و نفوذ پذیری الکتریکی (permeability) که برحسب مکانیزم جذب با عنوان اتلاف دی الکتریک و اتلاف مغناطیسی شناخته می‌شوند را داشته باشند. میزان جذب در مواد جاذب مغناطیس بستگی به اتلاف مغناطیسی دارد [۲۵].

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') \qquad \mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0(\mu_r' - \mu_r'')$$

$$\tan\delta_\mu = \mu''/\mu' \qquad \tan\delta_\varepsilon = \varepsilon''/\varepsilon'$$

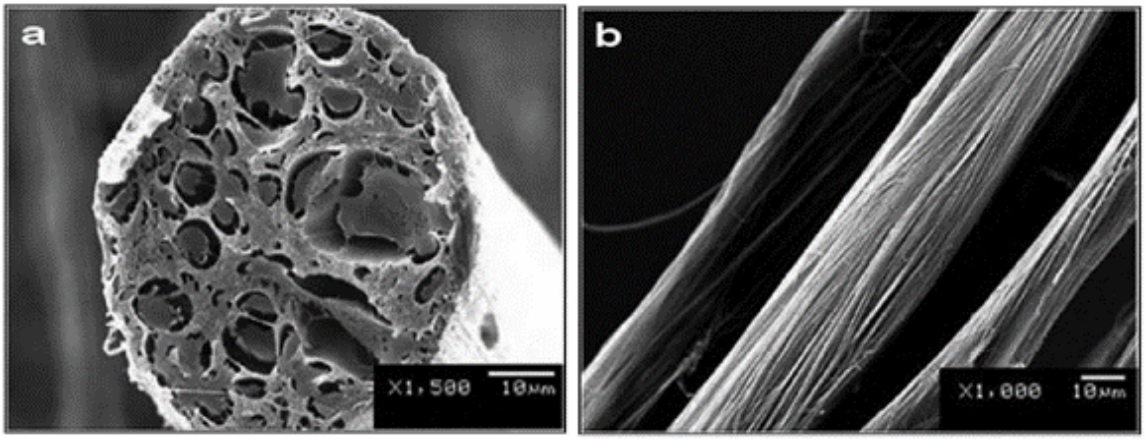
پوشش‌های جاذب امواج الکتریکی از طریق انعکاس‌های چندگانه باعث کاهش امواج الکترومغناطیس می‌شوند. مواد مغناطیسی اغلب گذردهی الکتریکی بالاتری نسبت به نفوذ پذیری مغناطیسی دارند. این مواد باید خواص دی الکتریکی و مغناطیسی همزمانی داشته باشند.

در این گزارش کامپوزیت‌های جاذب رادار را در دو زمینه مختلف بر حسب نوع ماتریس تقسیم بندی کرده و هم چنین بر اساس نوع تقویت کننده نیز بررسی می‌شوند.

اولین نوع کامپوزیتی که مورد بررسی قرار گرفته می‌شود، کامپوزیتی با ماتریس رزین اپوکسی می‌باشد [۲۶]. تقویت کننده‌ای که معمولا برای این رزین مورد استفاده قرار می‌گیرد، نانولوله‌های کربنی (CNT) می‌باشند که علاوه بر ایجاد خاصیت رسانایی الکتریکی در این ماتریس، خواص مکانیکی رزین را نیز افزایش می‌دهد. در سال‌های اخیر بسیاری از محققین این حوزه نشان دادند که نانو لوله‌های کربنی خواص منحصر بفردی از جمله خواص مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی را دارا می‌باشند [۲۷]. به وضوح نشان داده شده است که مواد مغناطیسی که در آنها از نانو لوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده در آنها استفاده شده است، دارای خاصیت جذب امواج مایکروویو خوبی هستند. بعلاوه به دلیل بالا بودن سطح موثر این تقویت کننده، قابلیت افزایش میزان اتلاف بازتابش با انجام یکسری عملیات تکمیلی مانند پوشش دهی و یا پر کردن با ذرات مغناطیسی

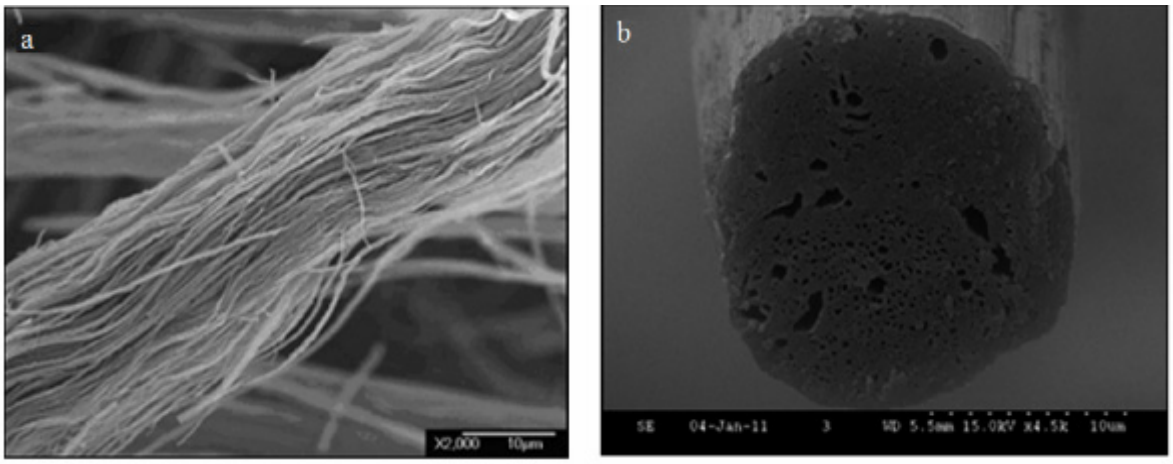
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

را دارا می‌باشد. از این رو، در سال‌های اخیر، ساختار و خواص مواد مغناطیسی که از نانو لوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده در آنها استفاده گردیده است، به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۷]. یکی از مهمترین تقویت کننده‌هایی که برای تقویت رزین اپوکسی به کار می‌رود، الیاف کربن می‌باشد که نسبت به دیگر تقویت کننده‌ها، دارای هزینه کمتری می‌باشد. در سال ۲۰۱۲ محققین دانشگاه شانگهای از الیاف کربن متخلخل که از نوع PAN/PMMA بودند، جهت تقویت خواص الکتریکی و مغناطیسی اپوکسی استفاده کردند (شکل ۲) [۲۶].



شکل ۲- تصویر عرضی از الیاف PAN/PMMA با نسبت ۷۰/۳۰ (a) تصویر سطحی و (b) بعد از واکنش با استون [۲۶].

شکل ۳ نشان دهنده تصاویر SEM از الیاف متخلخل و نانو الیاف کربنی می‌باشد.



شکل ۳- تصاویر SEM از: (a) دسته ای از نانو الیاف کربن و (b) سطح مقطع یک الیاف کربن [۲۶].

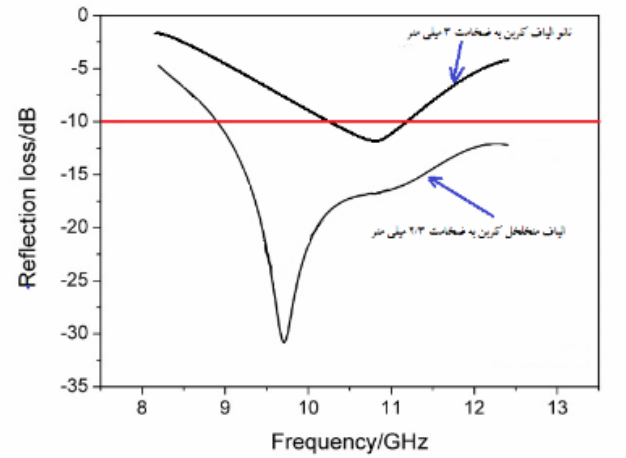
در طی بررسی های مختلف، این امر مشخص شد که خواص جذب مایکروویو با افزایش تعداد جذب کننده‌ها در زمینه کامپوزیتی، به صورت گسترده افزایش می‌یابد؛ همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، الیاف متخلخل کربن یک کارآیی نسبتا عالی در جذب امواج ماکروویو نسبت به نانو الیاف کربنی از خود نشان می‌دهند [۲۶].

با افزودن ۶ درصد وزنی از الیاف متخلخل کربنی، مقدار تلفات گزارش شده برای این کامپوزیت با ضخامت حدوداً ۲/۳ میلی متر ۳۱db–در ۹/۷ GHz بوده که در مقابل به کاربردن ۶ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی در حدود ۵۰ درصد کاهش در میزان انعکاس و کاهش ۷۰ درصدی در پهنای باند انعکاس (با حداقل ۱۰- دسی بل) را نشان داده به طوری که ۱۲/۲ db- در ۱۰/۷ GHz را گزارش شده است. نظر بر این است که این افزایش در میزان جذب امواج از نانوله الیاف به الیاف متخلخل به دلیل ترکیب جذب نوع دی‌الکتریک و تداخل انعکاس چندگانه امواج می‌باشد. از معایب استفاده از این روش می‌توان به ضخامت پوشش اشاره کرد که از ۲ میلی متر بیشتر می‌باشد. همچنین محدوده فرکانسی کم (۱۰/۳ الی ۱۱/۳) را پوشش می‌دهد که برای

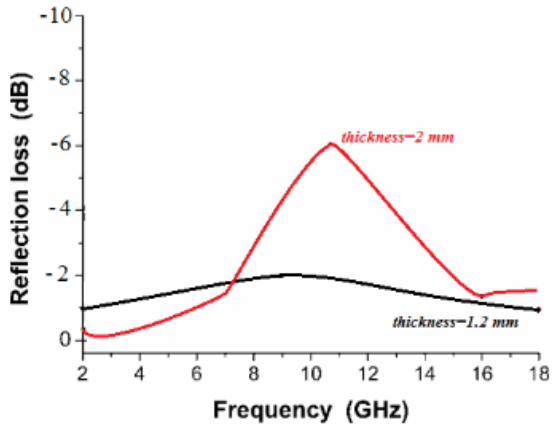
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

کاربردهای نظامی قابل استفاده نمی‌باشد. از معایب استفاده از نانولوله‌های کربنی، عدم پراکندگی یکنواخت آنها در رزین و نداشتن خاصیت مغناطیسی مناسب می‌باشد؛ بنابراین باید به صورت ترکیبی با دیگر تقویت کننده‌ها که دارای خاصیت مغناطیسی می‌باشند، مورد استفاده واقع شوند [۲۶].

شکل ۵ نشان دهنده اثر ضخامت بر اتلاف بازتابش در کامپوزیت‌های حاوی رزین اپوکسی و MWCNT (در حدود ۱/۱ درصد وزنی) می‌باشد [۲۸ و ۲۹]. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت تا یک مقدار بهینه میزان اتلاف بازتابش افزایش می‌یابد.



شکل ۴- مقایسه عملکرد نانو الیاف و الیاف متخلخل کربنی (در ۶ درصد وزنی) [۲۶].

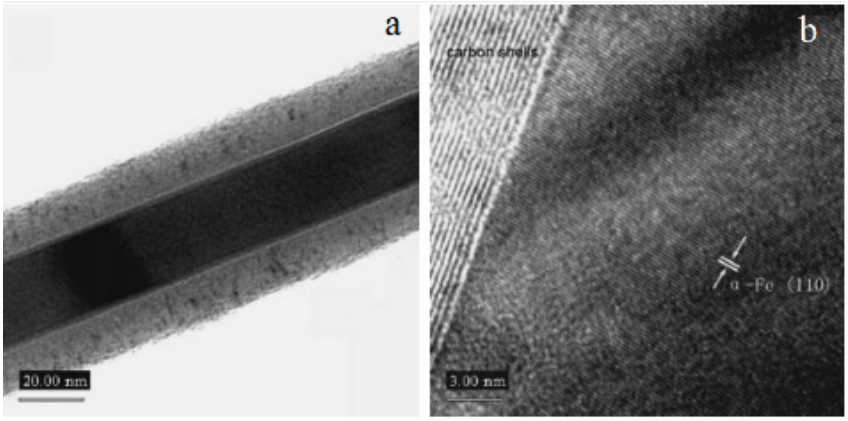


شکل ۵- مقایسه اثر ضخامت بر اتلاف بازتابش کامپوزیتی با رزین اپوکسی و تقویت کننده MWCNT [۲۸ و ۲۹].

در بحث انواع تقویت کننده‌هایی که در رزین اپوکسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، سعی بر این بود که اثر پر کردن نانو لوله‌های کربنی را با ذرات مغناطیسی مورد ارزیابی قرار بگیرد. بطور معمول، مواد کامپوزیتی شامل ذرات فلزی مغناطیسی مانند فریت، نیکل، روی و غیره به عنوان اتلاف مغناطیسی امواج الکترومغناطیس در اتصال با رزین‌های پلیمری عمل می‌کنند [۲۶]. از میان این تحقیقات می‌توان به ترکیب ذرات Fe با نانو لوله‌های کربنی اشاره کرد. یکی از روش‌هایی که می‌توان خواص الکتریکی و مغناطیسی CNT را افزایش داد، استفاده از Fe به عنوان پرکننده نانوله‌های می‌باشد. برای ساخت این نوع از نانوذرات از روش رسوب دهی فاز بخار (CVD)[1] استفاده شد. Renchao che و همکارانش در دپارتمان الکترونیک پکن، در سال ۲۰۰۴ بر روی این زمینه تحقیقاتی به عمل آورده و توانستند نانوکامپوزیت CNT/Fe (با نسبت ۵ به ۱ درصد وزنی) را تهیه نمایند که جهت اندازه‌گیری خواص مغناطیسی آن، این نانوذرات را در رزین اپوکسی توزیع کرده و به نتایج مناسبی که در شکل ۶ نشان داده شده است، دست یافتند [۲۹].

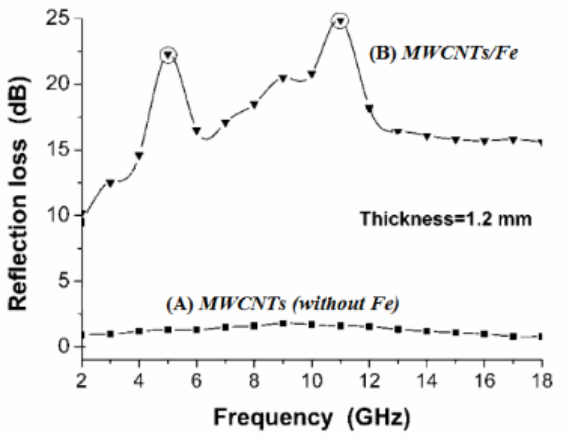
[1] Chemical Vapor Deposition

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]



شکل ۶- تصاویر TEM نانوکامپوزیت CNT/Fe در محدوده فرکانسی ۲ الی ۱۸ گیگاهرتز به طوری که Fe در (a) به صورت نانوسیم و در (b) به صورت نانو ذره مورد استفاده قرار گرفته و حداقل مقدار تلفات انعکاس آن db 10- گزارش شده است [۲۹].

شکل ۷ نشان دهنده اتلاف بازتابش مربوط به اثر پر کردن نانو الیاف کربن و رزین اپوکسی و اثر پر کردن نانو الیاف با ذرات آهن می‌باشد [۲۹]. با توجه به اینکه روش تهیه CNT پرشده با Fe، روش گرانقیمت می‌باشد، توجیه اقتصادی در زمینه صنعتی نخواهد داشت و صرفا جهت انجام تحقیقات آزمایشگاهی استفاده می‌شود.



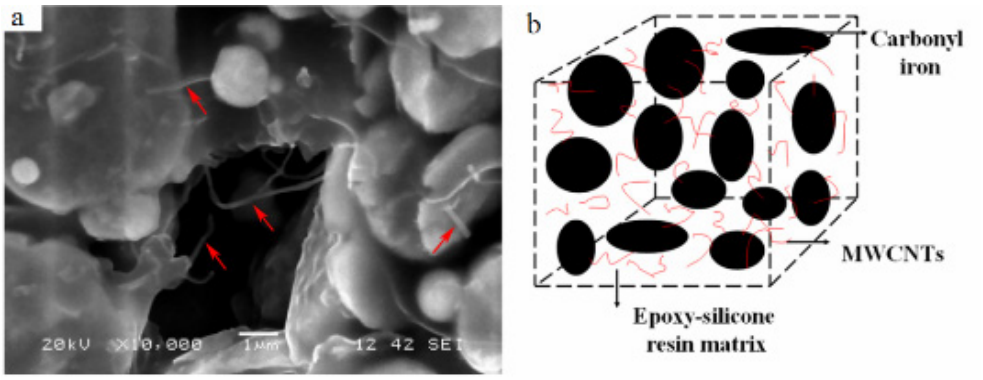
شکل ۷- مشخصه‌های جذب مربوط به: (A) نانو الیاف کربن و رزین اپوکسی، (B) پرکردن نانو الیاف با ذرات آهن [۲۹].

یکی از روش‌هایی که باعث تقویت خواص مغناطیسی و الکتریکی رزین اپوکسی می‌شود، استفاده از رزین اپوکسی–سیلیکون، به همراه تقویت کننده نانوالیاف چند دیواره (MWCNT)[1] با ذرات آهن کربونیل می‌باشد (شکل ۸) [۲۷]. این پوشش با ضخامت ۱/۵ میلی متر دارای محدوده فرکانسی ۳/۲ الی ۱۸ گیگاهرتز با حداقل و حداکثر مقدار تلفات منفی ۱۰ و ۱۸ دسی بل می‌باشد که به عنوان پوشش بسیار مناسب می‌باشد.

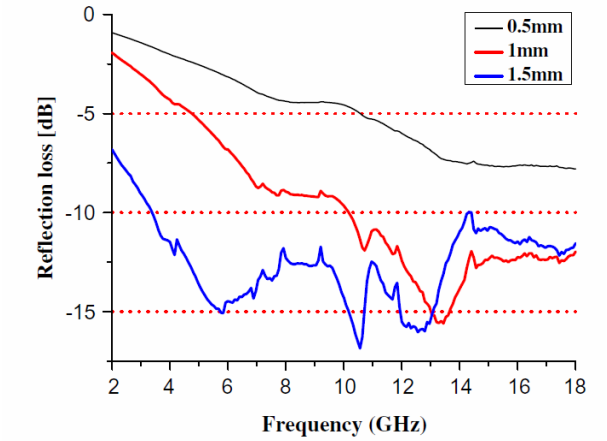
حضور نانوالیاف چند دیواره به همراه ذرات آهن کربونیل در زمینه رزین سیلیکونی، سبب ایجاد رفتار دوگانه تشدید ویژگی نفوذپذیری مغناطیسی شده که در نتیجه آن یک حرکت دیواره دایره‌ای در فرکانس‌های پایین و چرخش اسپینی در فرکانس‌های بالا گردیده است. به منظور فهم عملکرد جذب امواج مایکروویو در این کامپوزیت، می‌توان بیان نمود که دلیل بالا بودن خواص جذبی این کامپوزیت، تلفیق ویژگی اتلاف دی الکتریک و اتلاف مغناطیس می‌باشد. همانطور که قبلا هم اشاره شد، در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش ضخامت تا یک میزان بهینه می‌توان میزان جذب امواج را افزایش داد. از معایب این روش می‌توان به تهیه رزین اپوکسی– سیلیکونی اشاره کرد. همچنین پراکندگی یکنواخت چند تقویت کننده در سایز نانو، در درصدهای بالا بسیار مشکل بوده و به تجهیزات خاص نیاز دارد [۲۷].

[1] Multi-walled carbon nanotube

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

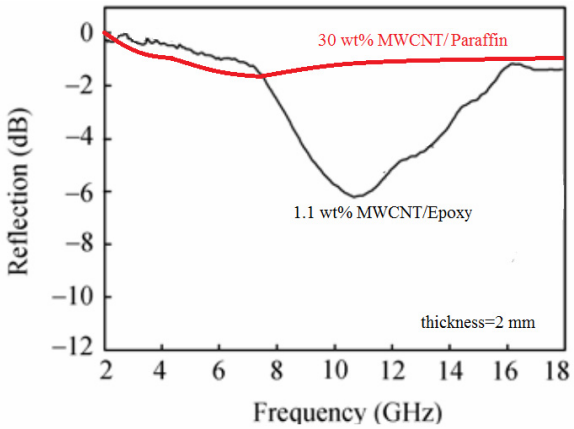


شکل ۸- (a) تصویر SEM از کامپوزیتی با تقویت کننده MWCNT و آهن کربونیل (نانوالیاف چند دیواره با نشانگرها نمایش داده شده است)، (b) تصویر شماتیک از این کامپوزیت [۲۷].



شکل ۹- اثر افزایش ضخامت بر میزان انعکاس امواج مایکروویو در کامپوزیتی با تقویت کننده MWCNT و آهن کربونیل [۲۷].

دومین زمینه‌ای که به عنوان فاز ماتریس مطرح شده است، پارافین یا واکس می‌باشد. برای تقویت خاصیت رسانایی این رزین معمولا از ترکیبات کربنی استفاده می‌شود. عمده‌ترین مزیت استفاده از این نوع رزین، وزن بسیار سبک آن می‌باشد. تقویت کننده‌هایی که جهت افزایش خواص الکتریکی در کنار دیگر خواص به کار می‌روند، معمولا برپایه نانو الیاف کربن می‌باشند. همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد، انتخاب نوع رزین اثر بسیار زیادی بر میزان جذب امواج مایکروویو دارد. به دلیل واکنش دادن هاردنر اپوکسی با ذرات تقویت کننده، خواص مکانیکی، حرارتی و عملکرد جذب امواج این نوع رزین در مقایسه با پارافین بسیار مطلوب تر می‌باشد.

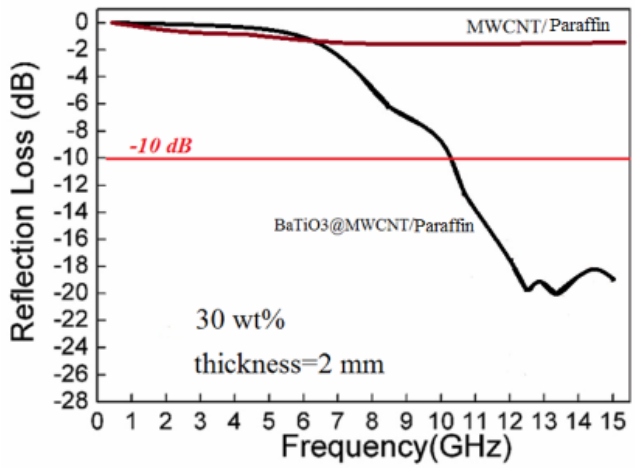


شکل ۱۰-مقایسه عملکرد دو نوع رزین اپوکسی و پارافین بر اتلاف بازتابش در کامپوزیتی با تقویت کننده MWCNT [۲۸].

شکل ۱۱ نیز نشان دهنده اثر فاز دوم در تقویت کننده بر عملکرد کامپوزیت با رزین پارافین و تقویت کننده MWCNT را نشان

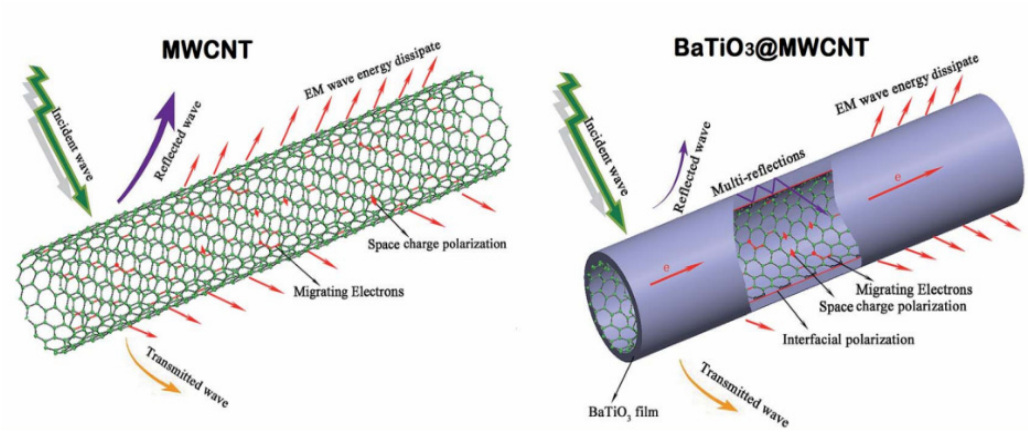
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از پوشش $BaTiO_3$ بر روی نانو الیاف کربن سبب بهبود چشمگیری در عملکرد کامپوزیت شده است [۳۰].



شکل ۱۱-مقایسه اثر افزودن ذرات $BaTiO_3$ به نانو الیاف کربن در کامپوزیتی با رزین پارافین [۲۸ و ۳۰].

برای فهم بهتر مکانیزم جذب در کامپوزیت $BaTiO_3$@MWCNT/Paraffin، شکل شماره ۱۲ ارائه شده است. مطابق شکل، اولاً به دلیل عدم انطباق مشخصه امپدانس در سطح نانو الیاف کربن، اکثریت امواج الکترومغناطیس تابشی بر روی سطوح نانو الیاف، بازتابیده می‌شوند در نتیجه هدایت الکتریکی بالای نانو الیاف کربن نمی‌تواند سبب جذب قابل توجهی شود. نانو الیاف پوشیده شده با پوشش $BaTiO_3$ به طور موثر سبب کاهش هدایت الکتریکی و در نتیجه با ایجاد یک انتطباق مناسب مشخصه امپدانس و همچنین کاهش شدت امواج بازتابیده شده در واقع سبب بهبود قابلیت جذب در کامپوزیت می گردد. بعلاوه کامپوزیت $BaTiO_3$@MWCNT/Paraffin دراصل یک سیستم ناهمگن می‌باشد به طوری که رفتارهای ریلکسیشن دی الکتریک به وسیله فصل مشترک‌های دی الکتریک اضافی و قطبیت بیشتر بارها بین $BaTiO_3$ و MWCNT، سبب ایجاد پیچیدگی بیشتر می‌شوند. در ضمن، ساختارهای ناهمگن در کامپوزیت‌ها به دلیل قطبیت در فصل مشترک، نقش مهمی را در جذب امواج ماکروویو ایفا می‌کنند. این امر به آنها این امکان را می‌دهد تا به عنوان دوقطبی عمل کرده و با برخورد امواج ماکروویو به آنها، دوقطبی‌ها چرخیده و سبب ایجاد خواص جذبی بالا می‌شود [۳۰].



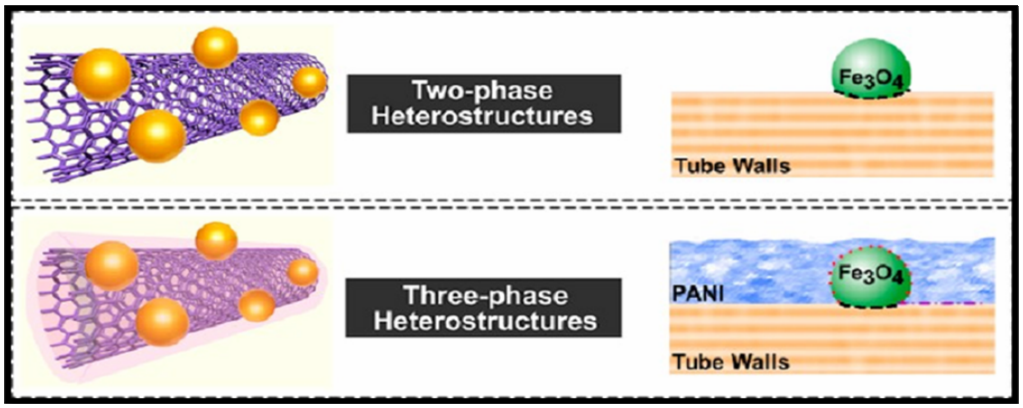
شکل ۱۲- تصویر شماتیکی از عملکرد پوشش $BaTiO_3$ بر شدت بازتابش امواج ماکروویو [۳۰].

در سال ۲۰۱۳ Deqing Zhang و همکارانش اثر فاز دوم و سوم تقویت کننده را در کامپوزیت MWCNT/Paraffin مورد بررسی قرار دادند [۸]. برای ساخت تقویت کننده دوفازی ناهمگن، از MWCNT و ذرات اکسیدفروفریک و از پلی آنیلین[1] (PANI) نیز به عنوان فاز سوم استفاده شد (شکل ۱۳) [۳۱ و ۳۲].

[1] Polyaniline

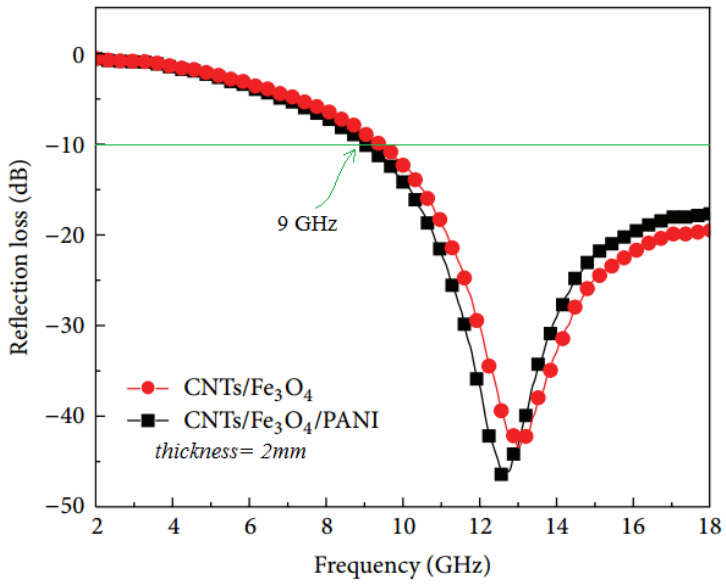
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]



شکل ۱۳- تصویر شماتیک از تقویت کننده‌های دوفازی (Fe_3O_4+MWCNT) و سه فازی (PANI+Fe_3O_4+MWCNT) [۳۲].

یکی از دلایل استفاده از نانو الیاف کربن در مقایسه با الیاف متخلخل کربن، مساحت سطح بسیار زیاد و قابلیت پوشش دهی سطوح بیشتر به جهت تقویت قابلیت جذب بالا آنها می‌باشد. در چهار دهه اخیر پلیمرهای رسانا (CPs)[1] به دلیل کاربردهای با ارزشی که در مبحث هدایت الکتریکی، آنهم به دلیل دارا بودند برانگیختگی‌های پولارون و بی پولارون در ساختارشان که سبب اثرات قطبی شدن قوی و ریلکسیشن[2] می‌باشد، یک جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. پلی آنیلین نیز نسبت به سایر پلیمرهای رسانا دارای خواص ویژه‌ای از جمله قابلیت دوپ شدن غیر اکسایشی-احیا[3]، پایداری محیلی مناسب و امکانات اقتصادی می‌باشند [۳۳]. با مقایسه این دونوع تقویت کننده مشاهده می‌شود که با ایجاد پوشش پلیمری روی تقویت کننده دوفازی، خواص الکتریکی و مغناطیسی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش خواص را می‌توان به ذات رسانای پلی آنیلین نسبت داد (شکل ۱۴) [۳۱].



شکل ۱۴- اثر افزودن فاز سوم به تقویت کننده بر میزان انعکاس امواج مایکروویو در کامپوزیت [۳۱].

۲- نتیجه‌گیری

امروزه پوشش‌های کامپوزیتی به دلیل داشتن خاصیت وزن کم، استحکام بالا و هم چنین خاصیت فرآیند پذیر بودن آن‌ها، جایگزین مناسبی برای پوشش‌های فلزی با خاصیت رادار گریزی می‌باشند. یکی از کاربردهای ویژه کربن در عرصه‌های نظامی، استفاده از این ماده در ساخت مواد جاذب رادار (RAM) جهت بهبود خاصیت جذب امواج مایکروویو می‌باشد به طوری که با

[1] Conductive Polymers
[2] Relaxation effects
[3] non-Redox doping

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]

بکارگیری کربن در این مواد جاذب می‌توان به خواص نهایی مطلوبی دست یافت. کامپوزیت‌هایی که در آنها از تقویت‌کننده‌های کربن آن‌هم به صورت ذره در یک زمینه پلیمری استفاده شده است به مراتب یک انعطاف پذیری و کنترل خواص مناسبی را از خود نشان داده و همچنین با تغییر اشکال تقویت کننده کربنی (مثل کربن سیاه، الیاف و نانو الیاف و همچنین گرافن) می‌توان خواص کامپوزیت را بهینه کرد. خواص جذبی این نوع مواد جاذب رادار با تغییر برخی پارامترهای موثر نظیر نوع زمینه پلیمری و یا با تغییر در هندسه، ترکیب، مورفولوژی و کسر حجمی تقویت کننده، قابل تغییر می‌باشد.

مراجع

[1] F. Qin and C. Brosseau; "A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 111, 061301 (2012).
[2] C. Brosseau, in Prospects in Filled Polymers Engineering: Mesostructure, Elasticity Network, and Macroscopic Properties, edited by C. Brosseau (Research Signpost, Trivandrum, India, 2008), pp. 177–227.
[3] R. H. Norman, Conductive Rubber and Plastics (Elsevier, New York, 1970).
[4] C. Brosseau, P. Molinie, F. Boulic, and F. Carmona, J. Appl. Phys. 89, 8297 (2001).
[5] J. Smit and H. P. J. Wijn, Ferrites: Physical Properties of Ferromagnetic Oxides in Relation to their Technical Applications (Philips Technical Library, Eindhoven, The Netherlands, 1959).
[6] B. Lax and K. J. Button, Microwave ferrites and ferrimagnetics (McGraw-Hill, New York, 1962).
[7] C. P. Neo and V. K. Varadan, IEEE Trans. Electromagn. Compat. 46, 102 (2004).
[8] V. B. Bregar, IEEE Trans. Magn. 40, 1679 (2004).
[9] S. P. Ruan, B. K. Xu, H. Suo, F. Q. Wu, S. Q. Xiang, and M. Y. Zhao, J. Magn. Magn. Mater. 212, 175 (2000).
[10] S. Wolff and M. J. Wang, Carbon Black, Science and Technology, 2nded. (Dekker, New York, 1993).
[11] P. G. Lederer, An Introduction to Radar Absorbent Materials (RAM) (Royal Signals and Radar Establishment, Malvern, England, 1986).
[12] N. V. Machinerieen, FR Pat. No. 802728 (1936)
[13] R. Stonier, SAMPE J. 27, 9 (1991).
[14] O. Halpern, U.S. Pat. No. 2,923,934 entitled "Method and Means For Minimizing Reflection of High Frequency Radio Waves" (1960).
[15] H. V. G. Stubbs, B. V. A. Wickenden, W. G. Howell, and E. D. Perry, UK Patent No. 2058469A (1981).
[16] J. N. Dahiya, R. Athinarayanan, J. A. Roberts, J. N. Tour, and D. W. Price, in Microwave and Optical Technology 2003, Vol. 5445,
[17] K. Q. He, L. M. Yu, L. M. Sheng, K. An, Y. Ando, and X. L. Zhao, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 125101 (2011).
[18] A. Y. Ge, B. S. Xu, X. M. Wang, T. B. Li, P. D. Han, and X. G. Liu, Acta Phys. Chim. Sin. 22, 203 (2006).
[19] H. Bi, K. C. Kou, K. Ostrikov, L. K. Yan, and Z. C. Wang, J. Alloy. Compd. 478, 796 (2009).
[20] X. Bai, Y. H. Zhai, and Y. Zhang, J. Phys. Chem. C 115, 11673 (2011).
[21] K. C. Pitman, M. W. Lindley, D. Simkin, and J. F. Cooper, IEE Proc. F, Radar Signal Process. 138, 223 (1991).
[22] X.G. Chen, Y. Ye, and J.P. Cheng, J. Inorg. Mater. 26, 449 (2011).
[23] C. Brosseau, Surf. Coating Tech. 206, 753 (2011).
[24] Merrill I.Skolnik, "Introduction to radar systems", Third Edition, McGraw-Hill, 2001.
[25] Hamish Meikle, "Modern Radar Systems",Second Edition, 2008.
[26] Guang Li, Tianshi Xie, Shenglin Yang, Junhong Jin, and Jianming Jiang; "Microwave Absorption Enhancement of Porous Carbon Fibers Compared with Carbon Nanofibers", Phys. Chem. C 2012, 116, 9196−9201.
[27] Yuchang Qing, Wancheng Zhou, Fa Luo, Dongmei Zhu; "Epoxy-silicone filled with multi-walled carbon nanotubes and carbonyl iron particles as a microwave absorber", CARBON48 (2010) 4074 – 4080.
[28] GUI XuChun, WANG KunLin, WEI JinQuan, LÜ RuiTao, SHU QinKe, JIA Yi, WANG Chen, ZHU HongWei & WU DeHai; "Microwave absorbing properties and magnetic properties of different carbon nanotubes", Sci China Ser E-Tech Sci, Jan. 2009, vol. 52, no. 1, 227-231.
[29] By Renchao Che, Lian-Mao Peng, Xiaofeng Duan, Qing Chen, Xuelei Liang; "Microwave Absorption Enhancement and Complex Permittivity and Permeability of Fe Encapsulated within Carbon Nanotubes", Adv. Mater, 2004, 16, No. 5, March 5.
[30] Yao-Feng Zhu, Qing-Qing Nia, Ya-Qin Fu, "One-dimensional barium titanate coated multiwalled carbon nanotube heterostructures: synthesis and electromagnetic absorption properties', RSC Adv. 2015, 5, 3748–3756.
[31] Deqing Zhang, Xiuying Yang, Junye Cheng, Mingming Lu, Bin Zhao, Maosheng Cao, "Facile Preparation, Characterization, and Highly Effective Microwave Absorption Performance of CNTs/Fe3O4/PANI Nanocomposites" Journal of Nanomaterials Volume 2013, Article ID 591893, 7 pages 20-9.
[32] Mao-Sheng Cao, Jian Yang, Wei-Li Song, De-Qing Zhang, Bo Wen, Hai-Bo Jin, Zhi-Ling Hou, Jie Yuan, "Ferroferric Oxide/Multiwalled Carbon Nanotube vs Polyaniline/ Ferroferric Oxide/ Multiwalled Carbon Nanotube Multiheterostructures for Highly Effective Microwave Absorption", ACS Appl. Mater. Interfaces 2012, 4, 6949−6956.
[33] Parveen Saini, Veena Choudhary, B.P. Singh, R.B. Mathur, S.K. Dhawan, "Polyaniline MWCNT nanocomposites for microwave absorption and EMI shielding", Materials Chemistry and Physics 113 (2009) 919–926

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1397.2.54.3.3]