

بررسی اثر هم‌افزایی FSS منسوج پایه و جاذب‌های چند لایه بر روی خواص جذب ریزموج پوشش‌های جاذب الکترومغناطیسی

فیروز قنبری^۱، حسین مهدوی^۲، شهرام مرادی دهقی^۱، منوچهر بهمنی^۱

۱ دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲ دانشکده شیمی، پردیس علوم دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت:

۹۹/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش:

۹۹/۰۵/۰۶

در این پژوهش یک پوشش جاذب ریز موج با پهنای باند وسیع بر پایه اپوکسی با ساختار چند لایه با مشارکت پرکننده‌های کاربید سیلیکون، نانو لوله کربن و کربونیل آهن که در بین لایه‌های آن توری فلز اندود شده با روزه‌های بافته شده شش ضلعی از جنس الیاف پلی‌استر به عنوان سطح انتخابگر فرکانسی استفاده گردیده، ساخته شد. با استفاده همزمان ساختار چند لایه و ساختار با کاهش تدریجی امپدانس، برخی از خواص بهینه مانند هزینه مناسب، میزان و پهنای باند جذب بالا و چگالی پایین بدست آمد. در این پژوهش اثر پوشش‌های جاذب تک لایه حاوی یک نوع پرکننده جاذب، تک لایه حاوی چند نوع پرکننده جاذب، چند لایه حاوی چند نوع پرکننده جاذب و چند لایه حاوی سطح انتخابگر فرکانس بر روی خواص بهینه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه تحلیل گر شبکه برای اندازه‌گیری مشخصه‌های الکترومغناطیسی و اتلاف انعکاس در بازه فرکانسی ۱۸-۲ GHz استفاده گردید. با استفاده از پوشش جاذب ریز موج متشکل از سه لایه حاوی پرکننده‌های چندگانه با غلظت‌های مختلف در لایه‌های مختلف و حاوی سطح انتخابگر فرکانس بین لایه‌های آن و در ضخامت کل ۲ mm در مقایسه با نمونه‌های دیگر بیشینه کاهش انعکاس ۵۰/۸۰ dB، پهنای باند جذب (RL<-5 dB) ۱۴/۲۳ GHz و چگالی ۱/۷۳ gr/m³ حاصل گردید. همچنین به منظور اثبات اثر سطح انتخابگر فرکانس بر روی خواص مکانیکی پوشش‌ها در کنار اثر آن بر روی خواص الکترومغناطیسی، خواص مکانیکی پوشش‌های فاقد سطح انتخابگر فرکانس و حاوی سطح انتخابگر فرکانس با استفاده از دستگاه آزمایش مقاومت کششی مقایسه گردید.

جذب ریزموج، سطح انتخابگر فرکانس، سیلیکون کاربید، کربونیل آهن، نانولوله کربن و جاذب‌های ریز موج چند لایه.

واژگان کلیدی

Investigating the Effect of Cohesive FSS of the Base Textile and Multilayer Absorbant on Microwave Absorption Properties of Electromagnetic Absorption Coatings

F. Ghanbari¹, H. Mahdavi^{2*}, Sh. Moradi Dehaghi¹, M. Bahmaei¹

¹ Faculty of Chemistry, Tehran North Branch - Islamic Azad University, Tehran, Iran

² School of Chemistry, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In this work, the fabrication of a broadband MAC with a multilayer structure, prepared by carbon nanotube (CNT), silicon carbide (SiC) and carbonyl iron (CI) particles as fillers, was carried out, in which a hexagonal mesh sized knitted polyester fabric was sandwiched between two layers functioning as the frequency selective surface (FSS). The gradient and alternating multilayer structures were simultaneously employed so that a number of optimum main properties, e.g. cost-efficiency, low density along with high and broad band microwave absorbing properties, could be attained. The impact of a single layer sample possessing one type of filler, a single layer sample possessing various types of fillers and a multilayer sample on the above-mentioned main parameters was also studied. Network analyzer was utilized in 4-18 GHz in order to analyze not only the electromagnetic parameters but also the reflection loss (RL) versus frequency of samples by using the transmission/reflection approach. In comparison with other samples, a return loss value as high as 50.80 dB, absorption band width (RL<-5 dB) as high as 14.23 GHz and density of 1.73 gr/cm³ could be achieved by using the multilayer MACs with three layers containing multi fillers (CNT, CI and SiC), with various concentrations, and two FSS film interlayers, possessing a 2mm total thickness. Furthermore, to verify the effect of FSS to improve mechanical properties of samples along its effect on microwave absorbing properties, the mechanical properties of samples containing FSS and without FSS analyzed by a standard tensile test instrument.

Keywords

Microwave absorbing, Frequency selective surface, FSS, Silicon carbide, Carbonyl iron, Carbon nanotube.

۱- مقدمه

افزایش روزانه توسعه و استفاده از تجهیزات الکترونیکی و ارتباطی در جامعه مدرن امروزی موجب افزایش آلودگی‌های الکترومغناطیسی (EM) برای زندگی روزانه انسان‌ها گردیده که منجر به آسیب‌های جدی سلامتی برای انسان‌ها شده است. علاوه بر این امروزه ضرورت حفاظت از تجهیزات و سامانه‌های گران‌قیمت نظامی در مقابل حسگرهای سنجش از دور مانند انواع رادارها روز به روز بیشتر گردیده است. بنابراین به منظور کاهش یا حذف این مشکلات، پژوهشگران دنیا بر روی تحقیق و توسعه مواد جاذب ریزموج متمرکز گردیده‌اند. تاکنون پژوهشگران برای بدست آوردن نتایج بهینه در این زمینه تلاش زیادی نموده‌اند اما همچنان چالش‌های زیادی برای بدست آوردن پوشش جاذب ریزموج دارای خواص جذب بالا، پهنای باند جذب گسترده، چگالی پایین، قیمت پایین، ضخامت پایین و دارای قابلیت استفاده صنعتی بالا پیشروی پژوهشگران دانشگاهی و صنعتی قرار دارد [۱و۲].

عموماً، مواد جاذب ریزموج در قالب محصولات متنوعی تولید یا استفاده می‌گردند که شامل رنگ‌ها، کامپوزیت‌های تک لایه و چند لایه، فیلم‌های نازک و ساختارهای جاذب رادار (RASS) هستند. پژوهش در این حوزه در دو دسته کلی جهت‌یابی گردیده‌اند: الف) پژوهش برای سنتز یک ماده جاذب ریزموج جدید که محصول حاصله غالباً گران‌قیمت و در مراحل ابتدایی بلوغ فناوری قرار گرفته و با مرحله تجاری سازی و کاربرد صنعتی فاصله زیادی دارند. ب) تجمیع، چیدمان مجدد یا مهندسی مواد، ساختارها و روش‌های جذب ریزموج موجود برای بدست آوردن پوشش‌های ریزموج موثر مورد نظر.

غالباً برای تهیه جاذب ریزموج تک لایه یا کامپوزیت‌های چند لایه از پخش نمودن پرکننده‌های دی‌الکتریک یا مغناطیسی به صورت تکی یا هر دو باهم در یک محمل پلیمری استفاده می‌گردد. معمولاً بیشتر جاذب‌های ریزموج تک لایه دارای جذب مناسب در محدوده باریکی از گستره فرکانسی مورد نظر می‌باشند در صورتیکه استفاده از جاذب‌های ریزموج چند لایه خواص جذبی مناسبی در محدوده وسیع‌تری را از طریق مشارکت پرکننده‌های مختلف در لایه‌های مختلف ایجاد می‌نمایند [۳].

استفاده از مواد مغناطیسی مانند فریت‌ها و فلزات دیگر به عنوان مواد جاذب ریزموج در ترکیب با محمل پلیمری می‌تواند منجر به تولید جاذب ریزموج با چگالی وزنی بالا و دارای خواص جذب مناسب در محدوده فرکانسی پایین گردد. درحالی‌که بکار بردن ذرات دی‌الکتریک مانند کربن و نانولوله‌های کربنی (CNT) در ترکیب با محمل پلیمری می‌تواند منجر به تولید پوشش‌های جاذب ضخیم و دارای خواص جذب مناسب در محدوده فرکانسی بالا گردد. بنابراین برای بدست آوردن پوشش جاذب ریزموج مورد نظر و بهینه معمولاً ترکیبی از مواد دی‌الکتریک و مغناطیس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

بر اساس الگوی توزیع پرکننده‌های جاذب در لایه‌های یک پوشش جاذب، لایه‌های جاذب می‌تواند به دو گروه تقسیم گردد:

الف- پوشش با جذب تدریجی امواج ریزموج که در این نوع از جاذب‌ها برای تطبیق امپدانس بهینه موج ورودی در فصل مشترک هوا و لایه اول، غلظت پرکننده جاذب می‌بایست به ترتیب از لایه‌های بالایی به تحتانی بصورت تدریجی افزایش یابد تا موج در برخورد اول هیچ گونه برگشتی نداشته باشد.

ب- سیستم چند لایه متناوب، در این سیستم موج ورودی به لحاظ عدم تطابق امپدانس بین لایه‌های داخلی، در اثر بازتاب‌های متعدد بین لایه‌ای در پوشش میرا می‌گردد.

پژوهش‌های قبلی نشان داده است که ذرات CNT به لحاظ چگالی پایین، هدایت الکتریکی قابل تنظیم و خواص مکانیکی خوب گزینه مناسبی برای مشارکت در کامپوزیت‌های کاهنده امواج ریزموج هستند. این ذرات نانو به عنوان جاذب مقاوم‌تری الکتریکی معمولاً برای جذب در نواحی فرکانسی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر کربونیل آهن (CI) به عنوان پرکننده جاذب مغناطیسی به لحاظ داشتن نفوذ پذیری مغناطیسی و مغناطش اشباع بالا ($4\pi Ms$) جذب الکترومغناطیسی خوبی در فرکانس‌های پایین نشان می‌دهد. بعلاوه کاربرد سیلیکون (SiC) یک نیمه هادی از گروه چهار جدول تناوبی است و به عنوان یک نیمه هادی ذاتی متناسب با نوع آلیاژ می‌تواند از نوع n یا p باشد و مشارکت این ماده به عنوان پرکننده جاذب امواج ریزموج علاوه بر داشتن خواص جذب الکترومغناطیسی، می‌تواند موجب کاهش چگالی و هزینه تمام شده پوشش و منجر به ارتقای خواص مکانیکی پوشش گردد [۵].

یکی دیگر از روش‌های رسیدن به پوشش‌های جاذب ریزموج با ضخامت و چگالی سطحی پایین و پهنای باند جذب بالا استفاده از سطوح انتخابگر فرکانسی (FSSs) می‌باشد. سطوح انتخابگر فرکانسی خود به تنهایی یا در ترکیب با پوشش‌های جاذب ریزموج چند لایه استفاده می‌گردند. سطوح انتخابگر فرکانسی آرایه‌های تکرار شونده دو بعدی هستند که به عنوان فیلترهای الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این آرایه‌ها متناسب با اینکه الگوی ساختاری آنها نواری یا روزنه‌ای باشند می‌توانند متوقف کننده باند یا عبور دهنده باند باشند. همچنین متناسب با هادی بودن و یا مقاوم‌تی بودن جنس عناصر تکرار شونده، این آرایه‌ها می‌توانند هادی یا مقاوم‌تی باشند. سطوح انتخابگر فرکانسی مقاوم‌تی می‌توانند از عناصر الیاف پایه فلز اندود شده یا استفاده از رنگ‌های هادی الکتریکی چاپ شده بر روی عایق در طرح‌ها و شکل‌های مختلف ایجاد شود [۶].

لذا در این پژوهش با تجمیع روش‌ها برای حصول خواص بهینه الکترومغناطیسی و مکانیکی از ساختارهای چند لایه و با چیدمان تدریجی CNT، SiC و CI به ترتیب کاهش امپدانس آنها از بالا به پایین استفاده گردیده و از ساختارهای FSS برای هدف دوگانه بهبود خواص جذب EM و خواص مکانیکی استفاده گردید.

۲- تجربی

۱-۲- مواد و تجهیزات مورد استفاده

در این پژوهش به منظور تهیه پوشش‌های تک لایه و چند لایه جاذب ریزموج، ذرات CI نوع EW-1 با متوسط اندازه ذرات $3-4 \mu\text{m}$ ، حاوی ۹۷٪ آهن و ۰/۹٪ کربن خریداری شده از شرکت BASF آلمان، CNT عامل‌دار شده با گروه کربوکسیل با متوسط قطر $15-25 \text{ nm}$ ، طول $1/5-0/5 \mu\text{m}$ و درصد خلوص ۹۵ خریداری شده از پژوهشگاه شرکت نفت، کاربید سیلیکون (SiC) صنعتی با متوسط اندازه ذرات ۱۵۰۰ مش تهیه شده از بازار، توری پارچه‌ای پلی استر با بافت ۶ ضلعی، با چگالی وزنی 80 g/m^2 ، مقاومت کششی ۴۰۰ N و ضخامت $0/2 \text{ mm}$ تهیه شده از بازار، رزین اپوکسی (EPL) E-06 خریداری شده از شرکت اپیران، سخت کننده اپیکور F205 دارای گرانشی پایین و حاوی عامل پخت کننده آمین سیکلوآلیفاتیک تهیه شده از شرکت اپیران و حلال‌های اتیل استات، بوتیل استات، استن و اتیل الکل تهیه شده از بازار مورد استفاده قرار گرفت.

شناسایی فاز پرکننده‌های جاذب با روش پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از تابش‌های Cu-Ka (مدل فیلیپس ژاپن) انجام گردید. همچنین ریخت شناسی پرکننده‌های جاذب و نحوه توزیع آنها در رنگپایه اپوکسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) مدل S-4160 شرکت هیتاچی تحت ولتاژ kV ۲۰ انجام گردید. برای اندازه‌گیری مقاومت سطحی آرایه‌های FSS منسوج پایه از دستگاه مقاومت سنج سطحی مدل ۸۷۳ شرکت سیستم‌های الکترونیک آمریکا استفاده گردید. از تحلیل گر شبکه Agi-lent E8364B برای اندازه‌گیری مشخصه‌های الکترومغناطیسی (ϵ و μ) نمونه‌ها بر پایه روش انعکاس / انتقال و همچنین برای اندازه‌گیری میزان کاهش انعکاس (RL) نمونه‌ها در اتاق آنتن در بازه فرکانسی ۱۸-۲ GHz استفاده گردید. دستگاه فلز اندود کننده رولی شرکت لیبولد-هرایوس (Leybold-Heraeus) برای لایه نشانی تحت خلع (PVD) مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش‌ها

۱-۲-۲- تهیه نمونه‌های تک لایه

ابتدا تعداد ۹ نمونه تک لایه اپوکسی پایه هر کدام حاوی یک پرکننده جاذب از سه پرکننده CI، CNT و SiC (هر پرکننده در سه درصد ترکیب مختلف) مطابق جدول ۱ تهیه گردید.

برای تهیه پوشش حاوی نانولوله کربن، ابتدا به میزان محاسبه شده از نانولوله کربنی به همراه نسبت ۵۰ برابر وزنی از مخلوط با نسبت وزنی ۵۰/۵۰ از حلال‌های اتیل استات و بوتیل استات به مدت ۴۰ دقیقه تحت پروب سونیکیت گردیده و به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزن مکانیکی قرار گرفت. رزین اپوکسی توزین و به ظرف اضافه شد و محلول مجدداً به مدت ۶۰ دقیقه تحت همزن قرار گرفت. پس از یکنواخت شدن کامل محلول، به میزان نصف رزین (نسبت رزین به سخت کننده در رزین مورد استفاده ۲ به ۱ وزنی می‌باشد) سخت کننده به مخلوط افزوده شد و مجدداً مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزن قرار گرفت. سپس مخلوط مورد نظر تا رسیدن گرانشی آن به 5 ± 20 ثانیه تحت فور کاپ ۴ با حلال رقیق شده و بر روی سطح آلومینیوم با ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر اسپری شد. بیشینه زمان گیرش مخلوط مورد نظر جهت حفظ گرانشی آن در محدوده مذکور ۶۰ دقیقه حاصل گردید. این عمل طی چند مرحله در طول یک هفته تا هنگامی که ضخامت لایه خشک نمونه به ۲ میلی‌متر برسد، تکرار شد. در نهایت نمونه نهایی به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده شد تا پوشش به صورت کامل خشک شود.

به منظور تهیه نمونه حاوی کربونیل آهن و سیلیکون کاربید، مقدار محاسبه شده از رزین توزین شد و به درون مخزن استوانه‌ای فلزی مربوط به پرل میل آزمایشگاهی ریخته شد. سپس به میزان محاسبه شده طبق درصد ترکیب جدول ۱ کربونیل آهن و یا سیلیکون کاربید به رزین اضافه شد. به منظور همگن شدن مقداری حلال نیز اضافه شد و سپس مخلوط به مدت ۲ ساعت تحت پرل میل آزمایشگاهی آسیاب گردید تا محلول یکنواخت حاصل شود. سپس سخت کننده به رزین افزوده شد و مخلوط مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزن قرار گرفت. مخلوط مورد نظر مشابه فرایند ذکر شده برای CNT با حلال رقیق شده و بر روی سطح آلومینیوم با ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر طی چند مرحله تا حصول ضخامت لایه خشک ۲ میلی‌متر اسپری گردید.

۲-۳-۲- تهیه نمونه‌های چند لایه

به منظور تهیه نمونه‌های چندلایه، فرایند اعمال هر یکی از لایه‌ها همانند فوق انجام گردید و ضخامت مورد نظر تهیه شد. لازم به ذکر است ضخامت کلی تمامی نمونه‌ها یکسان و برابر ۲ میلی‌متر است. نمونه‌های جاذب ریزموج چند لایه در این پژوهش، مطابق جدول ۲ تهیه گردید.

جدول ۱: درصد ترکیب پرکننده پوشش‌های تک لایه

نمونه پرکننده	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	۶#	۷#	۸#	۹#
CNT (Wt.%)	۳	۵	۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
SiC (Wt.%)	۰	۰	۰	۳۰	۴۰	۵۰	۰	۰	۰
CI (Wt.%)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۰	۷۰	۸۰
ضخامت (mm)	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

قبل از تهیه نمونه‌های چند لایه حاوی FSS منسوج پایه، توری پارچه‌ای با روزنه‌های شش ضلعی که طول هر ضلع آن $4/8 \pm 0/3$ mm و ضخامت آن 200 ± 10 μ m بود، با چگالی سطحی 80 gr/m² تهیه گردید. سپس توری مورد نظر به روش لایه نشانی تحت خلغ (PVD) با فلز آلومینیوم با کمینه مقاومت سطحی Ω ۲۰۰ پوشش داده شد.

پس از فلز اندود کردن توری مورد نظر، تکه‌هایی از آن به ابعاد برابر ابعاد زیرآیند آلومینیومی (10×10 cm) برش داده شد. زیرآیند آلومینیومی پس از آماده سازی سطح آن یک لایه از جاذب اپوکسی پایه مطابق جدول ۲ اعمال گردید. پس از خشک شدن تا مرحله قابلیت لمس با انگشت، توری فلز اندود شده مورد نظر پس از آغشته نمودن با رزین اپوکسی مخلوط شده با سخت کننده بر روی لایه جاذب چسبانده شد. مراحل بعدی برای اعمال لایه جاذب و پارچه توری مطابق مرحله مذکور، انجام گردید.

۳-۳-۲- تهیه نمونه برای اندازه‌گیری مشخصه‌های الکترومغناطیسی (ε و μ) پرکننده‌های جاذب

با توجه به اینکه اندازه‌گیری مشخصه‌های الکترومغناطیسی با استفاده از اندازه‌گیری مشخصه‌های S در دهانه موجبر با دستگاه تحلیگر شبکه اندازه‌گیری می‌گردد. لذا می‌بایست اندازه نمونه‌ها متناسب با ابعاد موجبر هر کدام از بازه‌های فرکانسی تحت مطالعه باشد. برای این منظور قالب‌های مورد نظر تهیه گردیده و نمونه‌های تک لایه با یک پرکننده جاذب براساس روش اشاره شده در بند ۳-۲-۱ مطابق ابعاد مورد نظر بدون زیرآیند فلزی ساخته شد.

جدول ۲: نمونه‌های با ساختار چند لایه چیدمان شده بر اساس الگوی کاهش تدریجی

<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۴ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۳۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۴۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۵۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>Neat resin</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۰</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۴ mm	SiC ۳۰%	۰/۲۸ mm	رژین خالص	۰/۱ mm	CNT ۵%	۰/۲۸ mm	SiC ۴۰%	۰/۲۸ mm	رژین خالص	۰/۱ mm	CNT ۷%	۰/۲۸ mm	SiC ۵۰%	۰/۲۸ mm	Neat resin	۰/۱ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۰		<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۳۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CI ۶۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۴۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CI ۷۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۵۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CI ۸۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۳</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۲ mm	SiC ۳۰%	۰/۲۳ mm	CI ۶۰%	۰/۲۲ mm	CNT ۵%	۰/۲۲ mm	SiC ۴۰%	۰/۲۲ mm	CI ۷۰%	۰/۲۲ mm	CNT ۷%	۰/۲۲ mm	SiC ۵۰%	۰/۲۲ mm	CI ۸۰%	۰/۲۲ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۳					
CNT ۳%	۰/۲۴ mm																																																
SiC ۳۰%	۰/۲۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۸ mm																																																
SiC ۴۰%	۰/۲۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۸ mm																																																
SiC ۵۰%	۰/۲۸ mm																																																
Neat resin	۰/۱ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۰																																																	
CNT ۳%	۰/۲۲ mm																																																
SiC ۳۰%	۰/۲۳ mm																																																
CI ۶۰%	۰/۲۲ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۲ mm																																																
SiC ۴۰%	۰/۲۲ mm																																																
CI ۷۰%	۰/۲۲ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۲ mm																																																
SiC ۵۰%	۰/۲۲ mm																																																
CI ۸۰%	۰/۲۲ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۳																																																	
<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۴ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۳۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۴۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۵۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۱</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۴ mm	SiC ۳۰%	۰/۲۸ mm	رژین خالص	۰/۱ mm	CNT ۵%	۰/۲۸ mm	SiC ۴۰%	۰/۲۸ mm	رژین خالص	۰/۱ mm	CNT ۷%	۰/۲۸ mm	SiC ۵۰%	۰/۲۸ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۱		<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۳۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CI ۶۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۴۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CI ۷۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۵۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td>CI ۸۰%</td><td>۰/۲۲ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۲</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۲ mm	SiC ۳۰%	۰/۲۳ mm	CI ۶۰%	۰/۲۲ mm	CNT ۵%	۰/۲۲ mm	SiC ۴۰%	۰/۲۲ mm	CI ۷۰%	۰/۲۲ mm	CNT ۷%	۰/۲۲ mm	SiC ۵۰%	۰/۲۲ mm	CI ۸۰%	۰/۲۲ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۲							
CNT ۳%	۰/۲۴ mm																																																
SiC ۳۰%	۰/۲۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۸ mm																																																
SiC ۴۰%	۰/۲۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۸ mm																																																
SiC ۵۰%	۰/۲۸ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۱																																																	
CNT ۳%	۰/۲۲ mm																																																
SiC ۳۰%	۰/۲۳ mm																																																
CI ۶۰%	۰/۲۲ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۲ mm																																																
SiC ۴۰%	۰/۲۲ mm																																																
CI ۷۰%	۰/۲۲ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۲ mm																																																
SiC ۵۰%	۰/۲۲ mm																																																
CI ۸۰%	۰/۲۲ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۲																																																	
<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۴ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۳۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۴۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۵۰%</td><td>۰/۲۸ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۴</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۴ mm	SiC ۳۰%	۰/۲۸ mm	رژین خالص	۰/۱ mm	CNT ۵%	۰/۲۸ mm	SiC ۴۰%	۰/۲۸ mm	رژین خالص	۰/۱ mm	CNT ۷%	۰/۲۸ mm	SiC ۵۰%	۰/۲۸ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۴		<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۳۰%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>CI ۶۰%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱۲ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۴۰%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>CI ۷۰%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱۲ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۵۰%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>CI ۸۰%</td><td>۰/۱۸ mm</td></tr> <tr><td>رژین خالص</td><td>۰/۱۴ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۵</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۱۸ mm	SiC ۳۰%	۰/۱۸ mm	CI ۶۰%	۰/۱۸ mm	رژین خالص	۰/۱۲ mm	CNT ۵%	۰/۱۸ mm	SiC ۴۰%	۰/۱۸ mm	CI ۷۰%	۰/۱۸ mm	رژین خالص	۰/۱۲ mm	CNT ۷%	۰/۱۸ mm	SiC ۵۰%	۰/۱۸ mm	CI ۸۰%	۰/۱۸ mm	رژین خالص	۰/۱۴ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۵	
CNT ۳%	۰/۲۴ mm																																																
SiC ۳۰%	۰/۲۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۸ mm																																																
SiC ۴۰%	۰/۲۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۸ mm																																																
SiC ۵۰%	۰/۲۸ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۴																																																	
CNT ۳%	۰/۱۸ mm																																																
SiC ۳۰%	۰/۱۸ mm																																																
CI ۶۰%	۰/۱۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱۲ mm																																																
CNT ۵%	۰/۱۸ mm																																																
SiC ۴۰%	۰/۱۸ mm																																																
CI ۷۰%	۰/۱۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱۲ mm																																																
CNT ۷%	۰/۱۸ mm																																																
SiC ۵۰%	۰/۱۸ mm																																																
CI ۸۰%	۰/۱۸ mm																																																
رژین خالص	۰/۱۴ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۵																																																	
<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۴ mm</td></tr> <tr><td>CI ۶۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CI ۷۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CI ۸۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۶</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۴ mm	CI ۶۰%	۰/۲۳ mm	CNT ۵%	۰/۲۳ mm	CI ۷۰%	۰/۲۳ mm	CNT ۷%	۰/۲۳ mm	CI ۸۰%	۰/۲۳ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۶		<table> <tr><td>CNT ۱%</td><td>۰/۷ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۱۰%</td><td>۰/۷ mm</td></tr> <tr><td>CI ۲۰%</td><td>۰/۷ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۱/۶۶</td><td>۰/۷ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۱۳/۳۳</td><td>۰/۷ mm</td></tr> <tr><td>CI ۲۳/۳۳</td><td>۰/۷ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۲/۳۳</td><td>۰/۶ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۱۶/۶۶</td><td>۰/۶ mm</td></tr> <tr><td>CI ۲۶/۶۶</td><td>۰/۶ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۵</td></tr> </table>	CNT ۱%	۰/۷ mm	SiC ۱۰%	۰/۷ mm	CI ۲۰%	۰/۷ mm	CNT ۱/۶۶	۰/۷ mm	SiC ۱۳/۳۳	۰/۷ mm	CI ۲۳/۳۳	۰/۷ mm	CNT ۲/۳۳	۰/۶ mm	SiC ۱۶/۶۶	۰/۶ mm	CI ۲۶/۶۶	۰/۶ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۵											
CNT ۳%	۰/۲۴ mm																																																
CI ۶۰%	۰/۲۳ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۳ mm																																																
CI ۷۰%	۰/۲۳ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۳ mm																																																
CI ۸۰%	۰/۲۳ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۶																																																	
CNT ۱%	۰/۷ mm																																																
SiC ۱۰%	۰/۷ mm																																																
CI ۲۰%	۰/۷ mm																																																
CNT ۱/۶۶	۰/۷ mm																																																
SiC ۱۳/۳۳	۰/۷ mm																																																
CI ۲۳/۳۳	۰/۷ mm																																																
CNT ۲/۳۳	۰/۶ mm																																																
SiC ۱۶/۶۶	۰/۶ mm																																																
CI ۲۶/۶۶	۰/۶ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۵																																																	
<table> <tr><td>CNT ۳%</td><td>۰/۲۴ mm</td></tr> <tr><td>CI ۶۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۵%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CI ۷۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CNT ۷%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td>CI ۸۰%</td><td>۰/۲۳ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۱</td></tr> </table>	CNT ۳%	۰/۲۴ mm	CI ۶۰%	۰/۲۳ mm	CNT ۵%	۰/۲۳ mm	CI ۷۰%	۰/۲۳ mm	CNT ۷%	۰/۲۳ mm	CI ۸۰%	۰/۲۳ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۱		<table> <tr><td>CNT ۱/۶۶</td><td>۱ mm</td></tr> <tr><td>SiC ۱۳/۳۳</td><td>۱ mm</td></tr> <tr><td>CI ۲۳/۳۳</td><td>۱ mm</td></tr> <tr><td colspan="2">زیرآیند آلومینیوم</td></tr> <tr><td colspan="2">#۱۶</td></tr> </table>	CNT ۱/۶۶	۱ mm	SiC ۱۳/۳۳	۱ mm	CI ۲۳/۳۳	۱ mm	زیرآیند آلومینیوم		#۱۶																							
CNT ۳%	۰/۲۴ mm																																																
CI ۶۰%	۰/۲۳ mm																																																
CNT ۵%	۰/۲۳ mm																																																
CI ۷۰%	۰/۲۳ mm																																																
CNT ۷%	۰/۲۳ mm																																																
CI ۸۰%	۰/۲۳ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۱																																																	
CNT ۱/۶۶	۱ mm																																																
SiC ۱۳/۳۳	۱ mm																																																
CI ۲۳/۳۳	۱ mm																																																
زیرآیند آلومینیوم																																																	
#۱۶																																																	

۳-۳-۲- تهیه نمونه برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی
برای این منظور نمونه‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به ترتیب تک لایه حاوی ترکیب پرکننده‌ها و فاقد FSS، سه لایه حاوی یک لایه FSS و سه لایه حاوی دو لایه FSS بدون زیرآیند فلزی و در ابعاد $100 \times 30 \times 4$ mm مطابق روش گفته شده در بندهای ۳-۲-۱ و ۳-۲-۲ ساخته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات ریخت شناسی

شکل ۱ الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) ذرات CNT، SiC و CI را نشان می‌دهد. الگوی پراش اشعه ایکس CNT نشان می‌دهد که ذرات CNT گرافیتی است برای اینکه قله اصلی آن مطابق الگوی استاندارد گرافیت (۰۰۲-۰۲۶-۱۰۷۹) می‌باشد. الگوی پراش اشعه ایکس پودر SiC نشان دهنده خلوص آن و تشکیل β -SiC می‌باشد. طیف پراش اشعه ایکس پودر CI با الگوی استاندارد پراش اشعه ایکس آهن (۰۱-۰۸۷-۰۷۲۳) مقایسه شده است. ساختار فاز بلوری شفاف و عاری از اکسید قله‌های پراش، مربوط به پودر CI می‌باشد. مجموعه داده‌ای ICDS در الگوی استاندارد آزمون XRD مورد استفاده قرار گرفت.

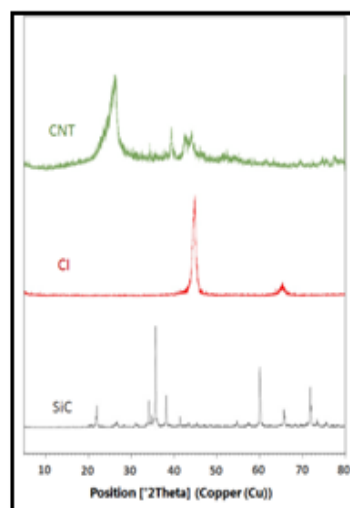
تصاویر FESEM ریخت شناسی پودرهای CNT، SiC و CI در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۲ (a) مشخص است نانولوله‌های کربنی دارای قطر خارجی در حدود ۳۰ تا ۵۰ نانومتر می‌باشند. شکل ۲ (b) شکل غیر منظمی در مقیاس چند میکرونی برای ذرات SiC نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲ (c) شکل کروی

ذرات CI با اندازه متوسط ۳-۴ میکرون قابل مشاهده است.

همچنین در شکل ۳ توزیع یکنواخت پرکننده‌های SiC، CNT و CI نشان داده شده است.

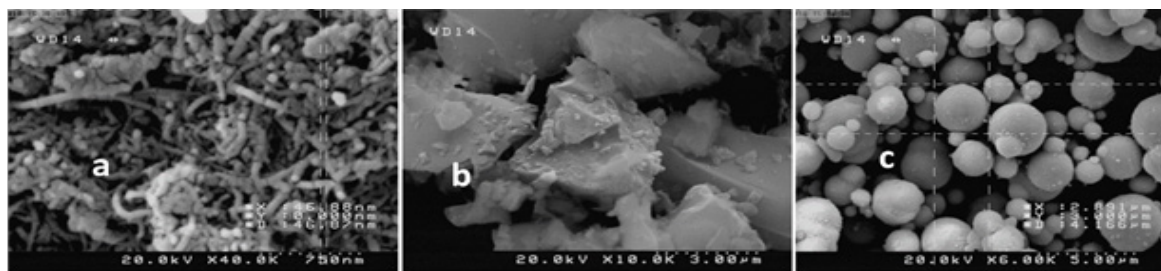
۳-۲- مشخصه‌های الکترومغناطیسی

مشخصه‌های الکترومغناطیسی CI، CNT و SiC به ترتیب در شکل‌های ۴ الی ۶ نشان داده شده است. مشخصه‌های مختلط الکترومغناطیسی نشانگر خواص دی‌الکتریک و مغناطیسی مواد می‌باشد. شکل ۴ گذردهی الکتریکی ($\epsilon'' = \epsilon' - j\epsilon''$)، نفوذ پذیری مغناطیسی ($\mu'' = \mu' - j\mu''$) و تانژانت تلفات ($\tan\delta$) کامپوزیت‌های اپوکسی/CI در سه غلظت مختلف و در محدوده فرکانسی ۲-۱۸ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. بخش‌های حقیقی گذردهی الکتریکی ϵ' و نفوذپذیری مغناطیسی μ' مربوط به ذخیر انرژی الکترومغناطیسی

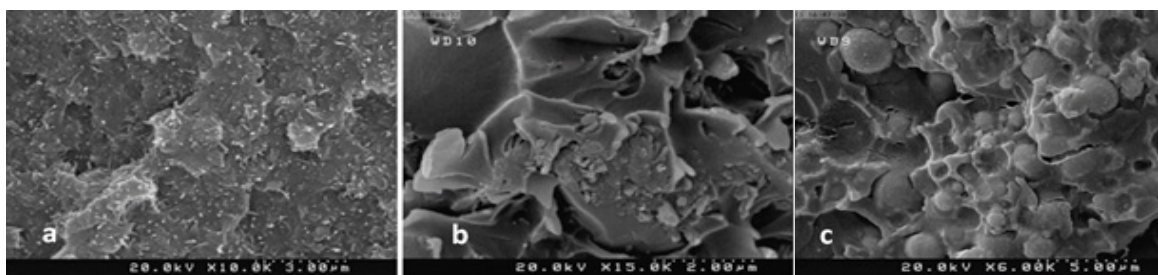


شکل ۱: الگوهای پراش اشعه ایکس CNT، SiC و CI

در کامپوزیت و بخش‌های موهومی ϵ'' و μ'' به ترتیب نمایانگر تلفات انرژی دی‌الکتریک و مغناطیسی کامپوزیت‌ها می‌باشند. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، بخش‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی (به ترتیب ϵ' و ϵ'')، بخش‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی (به ترتیب μ' و μ'') و تانژانت تلفات دی‌الکتریک و مغناطیسی (به ترتیب $\tan\delta\epsilon$ و $\tan\delta\mu$) با افزایش کسر وزنی پرکننده جاذب افزایش یافته است. این واقعیت در پژوهش‌های قبلی نیز گزارش شده است [۷]. شکل ۴ نشان می‌دهد که هر دو مشخصه گذردهی دی‌الکتریک مختلط، ϵ' و ϵ'' نمونه‌ها با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. این پدیده نشانگر این حقیقت است که قطبش دوقطبی‌های دی‌الکتریک با نوسان الکتریکی موج عبوری هم فاز است [۸]. همچنین مشاهده می‌گردد که بخش‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی (به ترتیب μ' و μ'') با افزایش فرکانس بطور جزئی کاهش می‌یابد که می‌تواند مربوط به حرکت دیواره حوزه‌ها و اثر آسایش باشد. نشان داده شده است که هر دو مشخصه μ' و μ'' در فرکانس ۲ گیگاهرتز به حد بیشینه خود (به ترتیب ۲/۷۱ و ۱/۶۳ برای ۸۰٪ CI) رسیده است. بر اساس گزارش لیو و همکاران منحنی‌ها نشانگر این است که رزونانس ذرات CI پایینتر از فرکانس ۲ گیگاهرتز می‌باشد [۹]. شکل ۵ بخش‌های حقیقی و موهومی (به ترتیب ϵ' و ϵ'') گذردهی الکتریکی مختلط وابسته به فرکانس کامپوزیت‌های حاوی CNT را در محدوده فرکانسی ۲-۱۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد جزء حقیقی ϵ' ابتدا از فرکانس‌های پایین تا اواسط محدوده فرکانسی مورد نظر کاهش یافته سپس در فرکانس‌های بالا روند افزایشی پیدا می‌کند. متقابلاً جزء موهومی



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشری (FESEM) پودر (a) CNT، پودر (b) SiC و پودر (c) CI



شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشری (FESEM) توزیع (a) CNT در نمونه شماره ۳، (b) SiC در نمونه شماره ۴ و (c) CI در نمونه شماره ۷

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \, \Omega \quad (3-4)$$

همچنین ضریب شکست پوشش بر اساس رابطه زیر با ریشه دوم گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی رابطه مستقیم دارد.

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (4-4)$$

که Z_0 , d , ϵ , μ و n به ترتیب نمایانگر امپدانس ورودی پوشش، امپدانس فضای آزاد، ضخامت پوشش، فرکانس، گذردهی الکتریکی مختلط، نفوذپذیری مغناطیسی مختلط و ضریب شکست پوشش می‌باشد. بهترین شرایط برای تابش بدون انعکاس زمانی حاصل می‌گردد که امپدانس ورودی پوشش مساوی امپدانس فضای آزاد گردد [۱۱]. از روابط بالا می‌توان فهمید که در کاهش انعکاس EM نفوذپذیری الکتریکی مختلط، گذردهی مغناطیسی مختلط و ضخامت پوشش نقش اساسی ایفاء می‌نمایند. همچنین گذردهی مغناطیسی و نفوذ پذیری الکتریکی پوشش‌ها متاثر از میزان درصد ترکیب مواد مغناطیسی و الکتریکی مشارکت کننده

گذردهی الکتریکی ϵ'' ، افزایشی در میانه‌های محدوده فرکانسی نشان می‌دهد. این نتایج موجب می‌گردد که تانژانت تلفات الکتریکی ϵ''/ϵ' و $\tan\delta\epsilon$ ، این کامپوزیت‌ها در میانه محدوده فرکانسی (۸-۱۰ گیگاهرتز) بیشینه افزایشی داشته باشد.

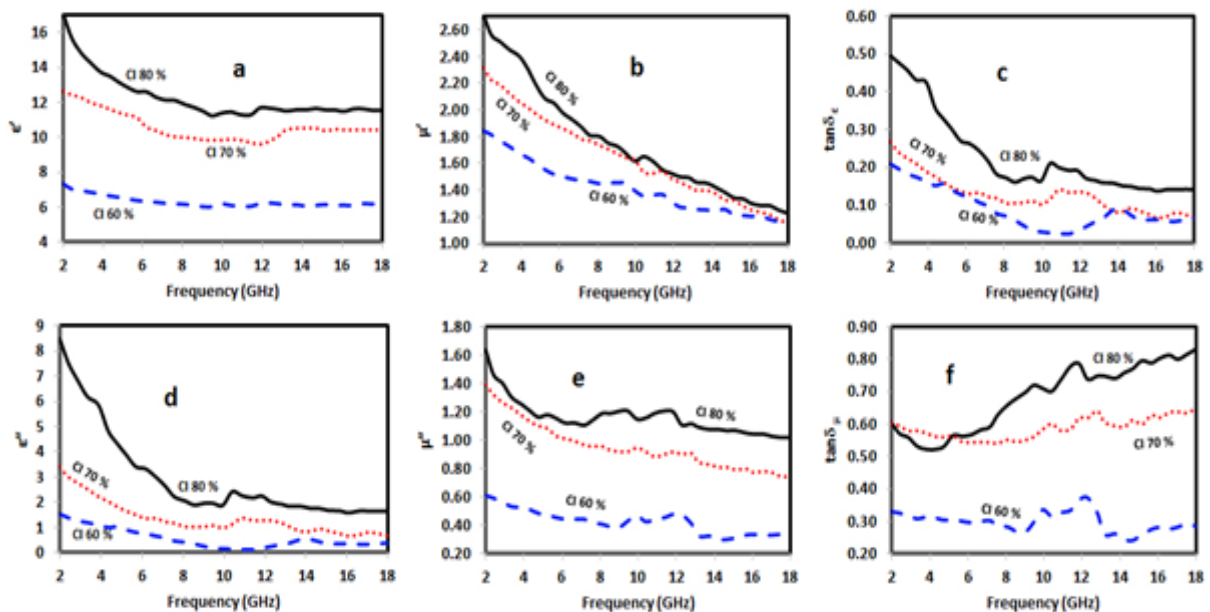
شکل ۶ گذردهی الکتریکی مختلط وابسته به فرکانس کامپوزیت‌های حاوی SiC را در محدوده فرکانسی ۲-۱۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد.

۳-۳- خواص جذب ریزموج پوشش‌های تک لایه

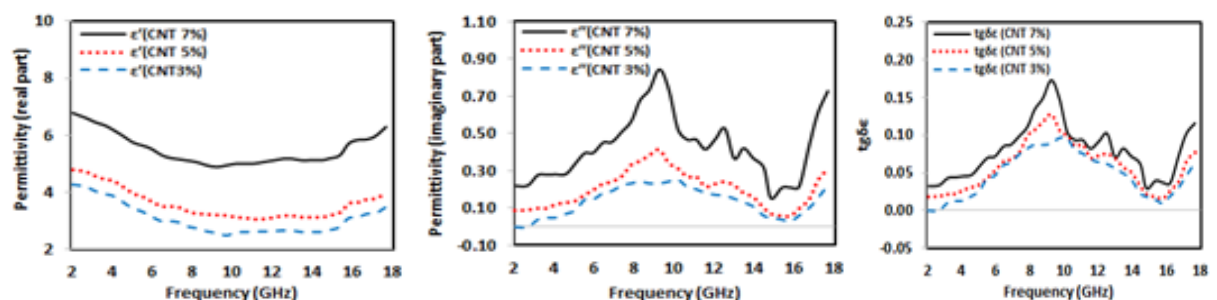
بر اساس تئوری خط انتقال کاهش انعکاس EM تحت زاویه صفر درجه از سطح پوشش جاذب ریزموج تک لایه حاوی زیرآیند فلزی با هدایت الکتریکی کامل به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۰]:

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1-4)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (2-4)$$



شکل ۴: منحنی‌های مشخصه‌های الکترومغناطیسی مرتبط با فرکانس کامپوزیت‌های اپوکسی/CI با سه کسر وزنی مختلف CI. (a) بخش حقیقی گذردهی الکتریکی (b) بخش موهومی گذردهی الکتریکی (c) تانژانت تلفات الکتریکی (d) بخش حقیقی نفوذپذیری مغناطیسی (e) بخش موهومی نفوذپذیری مغناطیسی (f) تانژانت تلفات مغناطیسی



شکل ۵: گذردهی الکتریکی مختلط و تانژانت تلفات الکتریکی وابسته به فرکانس کامپوزیت‌های اپوکسی/CNT

نمونه‌های حاوی CI می‌توان دریافت که نقطه بیشینه منحنی‌ها با افزایش درصد ترکیب ذرات CI به سمت فرکانس‌های پایین جابجا می‌گردد. بطور کلی از نتایج شکل‌های ۷ می‌توان فهمید که افزایش در مقادیر پرکننده‌های جاذب می‌تواند خواص جذب EM را در فرکانس‌های پایین بهبود بخشد. این پدیده با رابطه زیر قابل توضیح است [۱۲]:

$$f_m = \frac{nc}{4d\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (n=1, 2, 3\ldots) \quad (5-4)$$

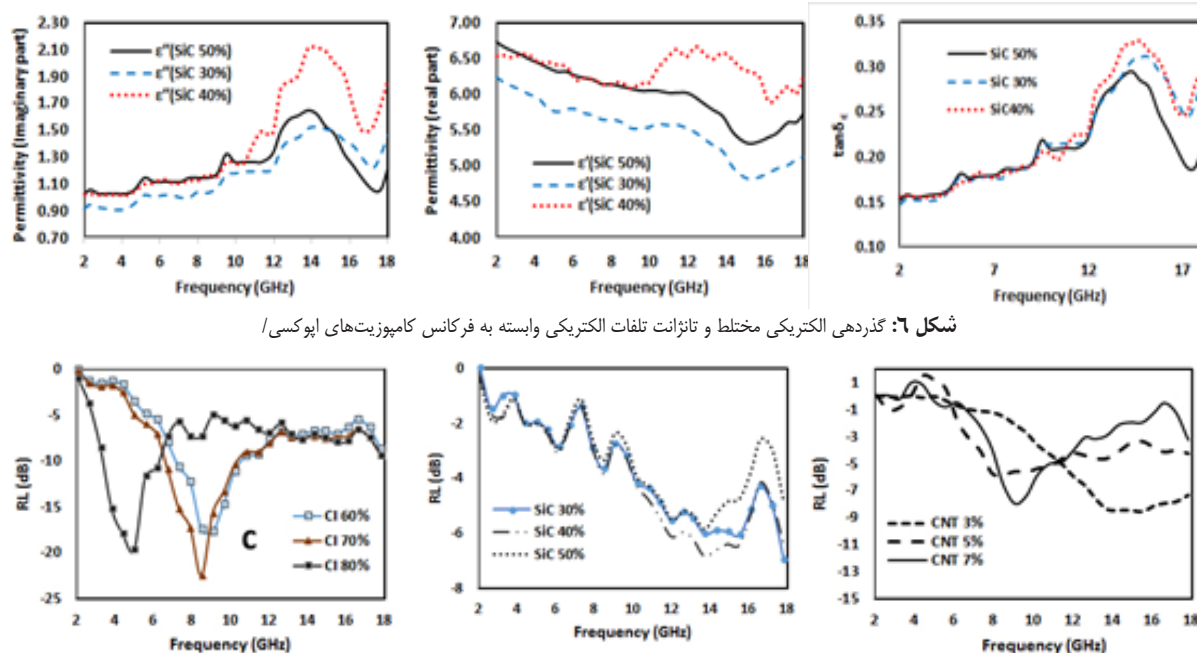
که f_m , d , ϵ و μ به ترتیب نمایانگر فرکانس، بیشینه جذب، سرعت نور، ضخامت نمونه و مشخصه‌های الکترومغناطیسی می‌باشند. این معادله نشان می‌دهد که فرکانس بیشینه جذب رابطه معکوسی با مشخصه‌های الکترومغناطیسی و ضخامت نمونه دارد. در این پژوهش ضخامت نمونه‌ها ثابت است ولی به لحاظ ارتباط مستقیم مشخصه‌های الکترومغناطیسی با غلظت پرکننده‌های جاذب مشارکت کننده در پوشش، در کل فرکانس بیشینه جذب f_m نمونه‌ها می‌تواند متأثر از میزان درصد ترکیب پرکننده‌ها باشد. به عبارت دیگر با افزایش مقدار پرکننده‌های جاذب، فرکانس بیشینه جذب به باندهای فرکانسی کمتر جابجا می‌گردد. این قانون کم و بیش برای جاذب‌های دی‌الکتریک CNT و SiC نیز برای دو غلظت پایین هرکدام رعایت گردیده است ولی همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این قانون برای CNT با غلظت ۷٪ و SiC با غلظت ۵۰٪ وزنی نقض گردیده است. این مورد می‌تواند به دلیل نسبت‌های حجمی بالای این دو جاذب برای غلظت‌های ذکر شده و در نتیجه کاهش عمق پوسته باشد. کاهش عمق پوسته می‌تواند منجر به کاهش جذب کلی و عدم جابجایی

در پوشش می‌باشد. لذا برای بدست آوردن خواص جذب ریزموج بهینه برای پوشش‌ها لازم است اثر مقدار پرکننده‌های جاذب در پوشش‌های تک لایه یا نحوه توزیع و چیدمان آنها در پوشش‌های چند لایه مورد بررسی قرار گیرد.

با استناد به مفهوم تطابق امپدانس قابل توضیح است که خواص جذب امواج با افزایش میزان درصد CNT در سطوح اولیه لایه پوششی به علت کاهش تطابق امپدانس کاهش می‌یابد. جاذب‌های دی‌الکتریک از نوع جاذب‌های رزونانسی و بر پایه سازوکار تضعیف EM از طریق اتلاف هدایت الکتریکی می‌باشند. با وجود اینکه در کل ضخامت پوشش برای جذب بیشتر EM میزان درصد ترکیب بیشتر CNT لازم است. اما این افزایش درصد ترکیب تا یک میزان بهینه‌ای جوابگوی افزایش جذب EM است. میزان درصد ترکیب بالاتر از میزان بهینه نتایج معکوس داده و موجب افزایش انعکاس امواج می‌گردد.

شکل ۷ نتایج اندازه‌گیری RL برحسب دسیبل (dB) پوشش‌های تک لایه و تک پرکننده در بازه فرکانسی ۲-۱۸ GHz را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف CNT در بازه فرکانسی ۲-۱۸ GHz رفتار متفاوتی نشان داده‌اند.

همچنین میزان RL نمونه‌های حاوی SiC از فرکانس‌های پایین تا بالا روند افزایشی داشته است. هر چند که میزان RL هر سه نمونه حاوی SiC در محدوده فرکانسی ۲-۱۲ GHz تقریباً مشابه می‌باشد، اما اختلاف RL نمونه‌ها مقدار اندکی در فرکانس‌های بالا (۱۲-۱۸ GHz) افزایش داشته است. از بررسی منحنی‌های RL



شکل ۶: گذردهی الکتریکی مختلط و تانزانت تلفات الکتریکی وابسته به فرکانس کامپوزیت‌های اپوکسی/

شکل ۷: منحنی‌های RL- فرکانس پوشش‌های تک لایه و تک پرکننده

بیشینه جذب نمونه‌ها به سمت فرکانس‌های پایین گردد.

۳-۴- خواص جذب EM پوشش‌های چند لایه

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که الگوی توزیع پرکننده‌های جاذب در داخل رنگپایه پلیمری می‌تواند روی خواص جذب EM اثر بگذارد [۱۳-۱۴]. در طراحی ساختار پوشش‌های چند لایه دو سازوکار هم‌افزا مشارکت دارد:

الف- مقدار پرکننده‌های جاذب و مشخصه‌های مختلط الکتریکی و مغناطیسی آنها از لایه‌های بالا به لایه‌های پایین برای به حداقل رساندن میزان بازتاب اولیه امواج در برخورد با لایه‌های اول می‌بایست به تدریج افزایش یابد.

ب- می‌بایست لایه‌های مختلف در طراحی ساختار پوشش جاذب به منظور افزایش انعکاس‌های بین لایه‌ای و افزایش طول مسیر عبور موج و در نتیجه مستهلک نمودن انرژی EM مورد استفاده قرارگیرد.

توزیع انتخابی پرکننده‌های جاذب در الگوی چند لایه‌ای در مقایسه با پوشش تک لایه می‌تواند انعکاسات بین لایه‌ای زیادی ایجاد نموده، موجب افزایش طول مسیر عبور موج گردیده و در نتیجه خواص جذب EM را بهبود می‌بخشد [۱۵].

بر اساس شرایط مرزی بر گرفته از معادلات ماکسول [۱۶]، وقتی یک موج ورودی EM تحت زاویه صفر از بین دو لایه که دارای ضخامت بی‌نهایت است عبور می‌کند، ضریب انعکاس که نشان دهنده نسبت موج EM منعکس شده به موج EM ورودی است می‌تواند با استفاده از امپدانس مشخصه دو لایه مربوطه بر اساس معادله ۴-۶ بدست آید:

$$\Gamma = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right| \quad (6-4)$$

که Γ نشانگر ضریب انعکاس و Z_1 و Z_2 امپدانس دو لایه هستند. البته در مواد واقعی هر لایه ضخامت محدودی دارد. بنابراین می‌توان انعکاسات چندگانه در نظر گرفت. در ساختارهای چند لایه، ضریب انعکاس کلی را با در نظر گرفتن اینکه امپدانس ورودی (Z_{in}) بر کل لایه‌ها اثر گذار است می‌توان بدست آورد. امپدانس ورودی $Z_{in}^{n \rightarrow m}$ مقاومت تابش EM بین لایه n و m می‌باشد.

امپدانس ورودی می‌تواند مطابق معادله ۴-۷ نشان داده شود.

$$Z_{in}^{n \rightarrow m} = Z_{in} \frac{Z_{in}^{m \rightarrow m-1} + Z_m \tanh(y_m d_m)}{Z_m + Z_{in}^{m \rightarrow m-1} \tanh(y_m d_m)} \quad (7-4)$$

که Z_m امپدانس مشخصه لایه، d_m ضخامت لایه و y_m لایه m ام می‌باشد که می‌توان مطابق معادله ۴-۸ بدست آورد.

$$y_m = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_m \mu_m} \quad (8-4)$$

که λ_0 طول موج EM تابشی، ϵ_m و μ_m به ترتیب گذردهی ذاتی الکتریکی و نفوذپذیری ذاتی مغناطیسی لایه m ام می‌باشند. بدین ترتیب ضریب انعکاس پوشش با ساختار چند لایه (Γ) با جاگذاری امپدانس مشخصه از معادله ۴-۶ برای امپدانس ورودی مطابق معادله ۴-۹ محاسبه می‌گردد.

$$\Gamma = \frac{Z_{in}^{N+1 \rightarrow N} - Z_0}{Z_0 + Z_{in}^{N+1 \rightarrow N}} \quad (9-4)$$

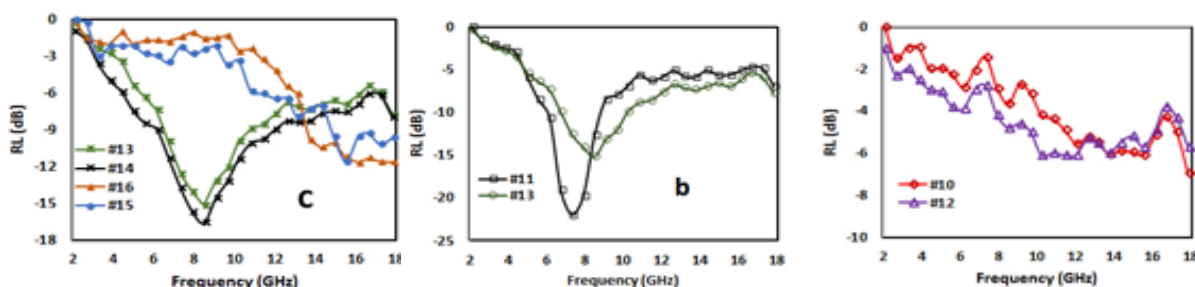
سپس RL موج EM ورودی تحت زاویه صفر می‌تواند با استفاده از معادله ۴-۱۰ محاسبه گردد.

$$RL = 20 \log |\Gamma| \quad (10-4)$$

از فرمول‌های بالا می‌توان دریافت که RL متأثر از گذردهی مغناطیسی مختلط (μ)، نفوذپذیری الکتریکی مختلط (ϵ) و ضخامت است. بهترین خواص جذب از طریق تطابق امپدانس مطابق معادله ۴-۱۱ حاصل می‌گردد.

$$Z_{in}^{N+1 \rightarrow N} = Z_0 \rightarrow \Gamma = 0 \quad (11-4)$$

شکل ۴-۸ منحنی‌های RL-فرکانس و جذب نمونه‌های ۱۰-۱۶ را که حاوی پرکننده‌های CNT، SiC و CI هستند نشان می‌دهد. در نمونه‌های ۱۰ و ۱۲ CNT و SiC در لایه‌های متناوب استفاده گردیده‌اند. غلظت این ذرات از لایه بالا تا پایین مطابق ساختار ارائه شده در جدول ۳-۳ بطور تدریجی افزایش داشته است. در نمونه شماره ۱۲ سه لایه داخلی اضافی حاوی رزین اپوکسی بدون پرکننده جاذب استفاده شده است در حالی‌که ضخامت کل در هر دو نمونه ثابت است و برخلاف کاهش میزان کل درصد پرکننده جاذب در نمونه ۱۲ نسبت به نمونه ۱۰ (به ترتیب ۱۸/۹۵ و ۲۲/۵۰)، میزان RL نمونه ۱۲ در کل بازه طیفی نسبت به نمونه ۱۰ افزایش داشته است. این پدیده را می‌توان به افزایش انعکاس‌های چندگانه بین لایه‌ای نسبت داد [۱۷].



شکل ۸: منحنی‌های RL-فرکانس پوشش‌های چند لایه ۱۰-۱۶

جداگانه را تشکیل داده است. به عبارت دیگر هر کدام از لایه‌های حاوی تک پرکننده جاذب سه بار و به ترتیب افزایش پرکننده‌های آن از بالا به پایین تکرار شده است. لذا بطور واضح نشان داده شده است که مقدار RL این نمونه در محدوده فرکانسی ۱۳/۷-۲ GHz داشته است. با وجود کاهش مقدار کلی پرکننده جاذب در نمونه ۱۴، به خاطر کاربرد سه لایه رزین اپوکسی فاقد پرکننده جاذب بین لایه‌های آن، میزان RL آن افزایش داشته است. نتایج حاصله را می‌توان ناشی از افزایش انعکاس‌های چندگانه بین لایه‌ای و در نتیجه افزایش مسیر عبور امواج EM دانست.

۳-۵- خواص جذب EM پوشش‌های چند لایه حاوی

FSS

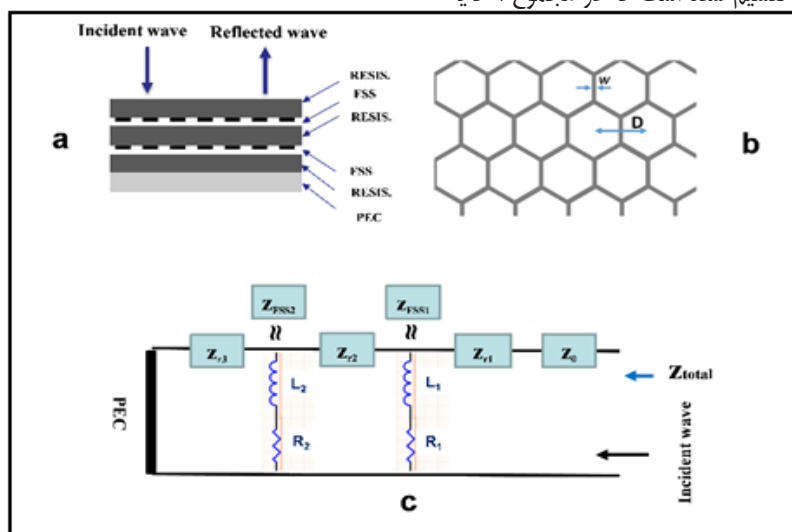
در این پژوهش از FSS مقاومتی بر پایه الیاف پلی‌استر فلز اندود شده در مابین لایه‌های جاذب الکتریکی و مغناطیسی استفاده گردیده است (شکل ۹ a). عناصر تکرارشونده در این نوع FSS از نوع هادی کامل نیستند بلکه از نوع مقاومتی ایجاد شده با استفاده از فرایند PVD می‌باشد. در این پژوهش عناصر شش ضلعی تکرارشونده ساختار FSS یک آرایه پیوسته دارند به عبارت دیگر فاصله‌ای بین عناصر تکرار شونده وجود ندارد (شکل ۹ b). بنابر این اثر خازنی که در اثر تابش امواج EM ایجاد شده باشد برای این مدل نمی‌توان تصور نمود. اما می‌توان یک اثر القایی الکتریکی در روی شبکه سلول‌های تکرار شونده پیوسته و یک اثر تلفات اهمی ناشی از ماهیت مقاومتی آرایه در نظر گرفت (شکل ۹ c). امپدانس FSS می‌تواند از طریق یک مدار سلفی-مقاومتی سری (RL) مطابق معادله ۴-۱۲ و ۴-۱۳ تعریف گردد:

همچنین شکل ۸ منحنی‌های RL- فرکانس و جذب نمونه‌های ۱۱ و ۱۳ حاوی ذرات CNT و CI را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها، CNT و CI در لایه‌های متناوب مشابه آنچه برای نمونه‌های ۱۰ و ۱۲ گفته شد توزیع گردیده‌اند. در نمونه ۱۳، مقدار کلی پرکننده‌ها کاهش یافته است اما مقدار RL آن در مقایسه با نمونه ۱۱ در محدوده فرکانسی بالاتر از ۸/۴۸ GHz افزایش داشته است که این افزایش می‌تواند ناشی از بکار بردن سه لایه رزین اپوکسی فاقد پرکننده باشد. هرچند که بخاطر کاهش پرکننده مغناطیسی CI در نمونه ۱۳ میزان RL آن در بازه فرکانسی ۵-۸/۴۹ GHz نسبت به نمونه ۱۱ کاهش یافته است. وجود ذرات CI به عنوان یک پرکننده مغناطیسی موثر در نمونه‌های ۱۱ و ۱۳ موجب افزایش RL آنها در مقایسه با نمونه‌های ۱۰ و ۱۲ گردیده است.

شکل ۸ منحنی‌های RL- فرکانس و جذب نمونه‌های ۱۳-۱۶ حاوی پرکننده‌های سه گانه CNT و SiC و CI را نشان می‌دهد. ضخامت فیلم خشک همه نمونه‌ها ۲ mm بوده و غلظت پرکننده‌های سه گانه در نمونه‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۶ مشابه هستند. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است نمونه ۱۶ یک نمونه تک لایه حاوی هر سه پرکننده جاذب مشارکت کننده در نمونه‌های ۱۳ و ۱۵ می‌باشد.

در نمونه ۱۵، یک پوشش تک لایه بدون تغییر در غلظت کلی پرکننده‌های آن به سه لایه معادل تقسیم گردیده و غلظت پرکننده‌ها بطور تدریجی از لایه بالا به پایین اضافه شده است. بنابر این بخاطر افزایش تعداد لایه‌ها با وجود ثابت بودن مقدار کلی پرکننده‌ها میزان RL نمونه ۱۵ در بازه فرکانسی ۱۳-۳/۲۵ GHz افزایش یافته است.

در نمونه ۱۳ هر کدام از لایه‌های نمونه ۱۵ به سه لایه و هر لایه حاوی تک پرکننده جاذب تقسیم شده است که در مجموع ۹ لایه



شکل ۹: پوشش‌های چند لایه حاوی FSS (a)، طرحواره FSS مقاومتی برپایه الیاف پارچه (b) و مدل مدار معادل (c)

برای اثبات نقش آرایه FSS در بهبود خواص جذب الکترومغناطیسی، کامپوزیت‌های حاوی یک لایه FSS، دو لایه FSS و فاقد FSS مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰ منحنی‌های RL - فرکانس و میزان جذب نمونه ۱۴ و ۱۵ فاقد FSS و نمونه ۱۷ و ۱۸ به ترتیب با یک لایه FSS و دو لایه FSS را نشان می‌دهد. ساختار نمونه ۱۷ همانند ساختار نمونه ۱۵ بوده ولی زیر لایه اول یک لایه FSS شش ضلعی با سلول‌های به هم پیوسته استفاده گردیده است. همانطور که در شکل ۴-۱۰ ملاحظه می‌گردد میانگین RL نمونه ۱۵ نسبت به نمونه ۱۷ به ترتیب از ۴/۷۶ dB به ۱۰/۳۴ dB و پهنای باند جذب آن از ۷/۲ GHz به ۱۳/۴۶ GHz و بیشینه جذب از ۱۱/۶۱ dB به ۳۷/۳۶ dB افزایش یافته است. در حالیکه ضخامت، چگالی وزنی و میزان پرکننده جاذب هر دو نمونه یکسان می‌باشد.

همچنین در شکل ۱۰ خواص جذب الکترومغناطیسی نمونه ۱۷ با یک لایه FSS و نمونه ۱۸ با دو لایه FSS نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با وجود داشتن ضخامت، چگالی و درصد پرکننده جاذب مشابه دو نمونه نسبت به هم، پهنای باند جذب بالاتر از ۵ دسیبل نمونه ۱۸ به ۱۴/۲۳ GHz، بیشینه جذب آن به ۵۰/۸۰ dB و میانگین جذب آن در بازه فرکانسی مورد نظر به ۱۷/۳۸ dB افزایش یافته است. در شکل ۱۰ دو بیشینه تیز ملاحظه می‌گردد که می‌توان به رزونانس جذب موج توسط دو لایه FSS نسبت داد. با توجه به ثابت بودن ضخامت (۲ mm) از لحاظ تجربی امکان استفاده از لایه‌های بیشتر FSS منسوج پایه مقدور نبود. لذا باتوجه به شکل ۱۰ با مقایسه نتایج نمونه ۱۴ به عنوان بهترین نمونه چند لایه فاقد FSS و نمونه ۱۸ با سه لایه جاذب تدریجی و دو لایه FSS ملاحظه می‌گردد که میزان متوسط RL، پهنای باند جذب بالاتر از ۵ دسیبل و بیشینه جذب از نمونه ۱۴ به نمونه ۱۸ به ترتیب از ۸/۶۷ dB به ۱۷/۳۸ dB، ۱۴/۱۷ GHz به ۱۴/۲۳ GHz و ۱۷/۶۰ dB به ۵۰/۸۰ dB افزایش نموده است. ساختار چند لایه حاوی دو لایه FSS (نمونه ۱۸) و سازوکار برهم کنش موج EM با آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشخصه‌های کلیدی نمونه‌های جاذب ریزموج مورد پژوهش مانند

$$Z_{FSS} = R + j\omega L \quad (۱۲-۴)$$

$$L = \mu_0 \frac{D}{2\pi} \log\left(\frac{1}{\sin(\frac{\pi w}{2D})}\right) \quad (۱۳-۴)$$

براساس سازوکار اصلی طراحی واحد ساختار واحد تکرار شونده FSS طول محیط سلول (C_{cell}) تکرار شونده می‌بایست برابر طول موج فرکانس رزونانس محدوده فرکانسی مورد نظر باشد. همچنین جهت جلوگیری از بروز لوب‌های انعکاسی جانبی فاصله تناوبی سلول تکرار شونده (D_{cell}) در شکل ۴-۹ می‌بایست کوچکتر از کوتاهترین طول موج (λ_{min}) محدوده فرکانسی باشد و همچنین برای ثبات نتایج تحت زوایای مختلف تابشی EM این فاصله (D_{cell}) باید کمتر از نصف متوسط طول موج بازه فرکانسی باشد [۱۴].

براساس سازوکار طراحی اشاره شده بالا می‌توان معادلات ۴-۱۴ الی ۴-۱۶ را برای طراحی ابعاد سلول تکرار شونده نوشت.

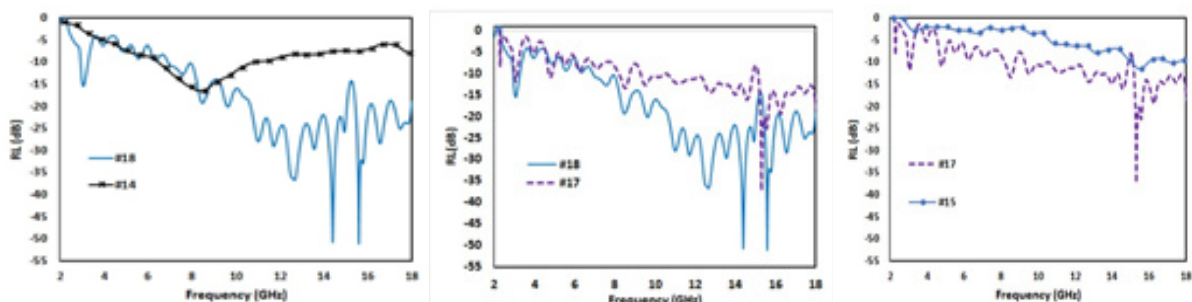
$$C_{cell} \cong \lambda_r \quad (۱۴-۴)$$

$$D_{cell} < \lambda_{min} \quad (۱۵-۴)$$

$$D_{cell} < \frac{\lambda_{avg}}{2} \quad (۱۶-۴)$$

در این پژوهش براساس محدود فرکانسی مورد پژوهش (۱۸-۲ GHz) می‌بایست فاصله تناوبی واحد تکرار شونده (D_{cell}) کمتر از ۱۶/۶۷ mm برای ۱۸ GHz به عنوان λ_{min} و کمتر از ۱۵ mm برای ۲ GHz به عنوان نصف طول موج متوسطه بازه فرکانسی مورد مطالعه (λ_{avg}) و همچنین محیط سلول تکرار شونده برابر ۳۰ mm به عنوان طول موج رزونانس محدوده فرکانسی که در این پژوهش برابر طول موج متوسط ناحیه فرکانسی منظور گردیده است، باشد.

در بخش ۳-۳ ملاحظه گردید که افزایش تعداد لایه‌ها و اضافه کردن لایه‌های فاقد پرکننده جاذب در میان لایه‌ها موجب افزایش بیشتر پهنای باند جذب و میزان RL می‌گردد. یکی از اهداف پژوهش با توجه به پیش‌بینی مشکلات احتمالی برای کاربرد تجربی و پیچیدگی‌های به وجود آمده برای اعمال لایه‌های متعدد در یک پوشش، به منظور کاهش لایه‌ها به شرط حفظ خواص بهینه مورد نظر، از آرایه‌های FSS بهره‌گیری گردید.

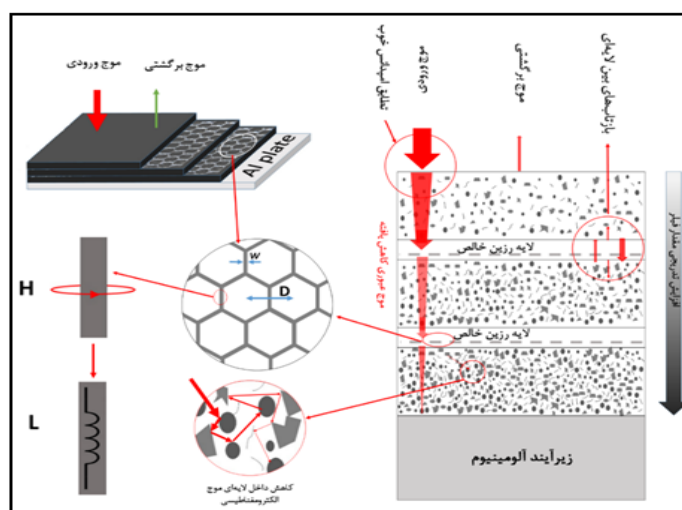


شکل ۱۰: منحنی‌های RL - فرکانس نمونه‌های چند لایه ۱۵ و ۱۴ فاقد FSS و ۱۷ و ۱۸ به ترتیب حاوی یک لایه FSS و دو لایه FSS

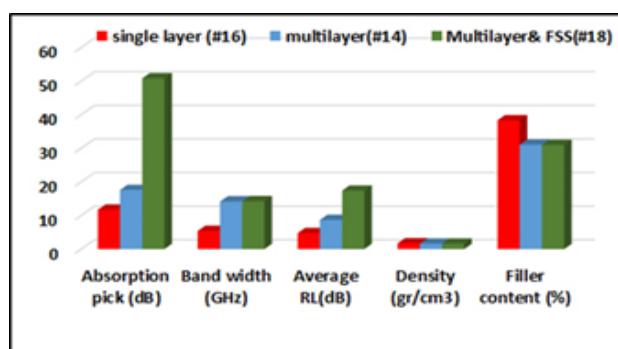
مغناطیسی می‌باشد. در نمونه ۱۴ به عنوان نمونه بهینه فاقد FSS، یک اثر هم افزایی از مشارکت سه پرکننده جاذب برای بدست آوردن خواص جذب EM مشاهده می‌گردد. سازوکار جذب پرکننده جاذب CI بطور عمده ناشی از تلفات پسماند، تلفات جریان گردابی و تلفات رزونانس فرومغناطیس می‌باشد [۳۰]. تلفات دی‌الکتریک توسط بار ناشی از پلاریزاسیون پرکننده‌های دی‌الکتریک مانند CNT حاصل می‌گردد. همچنین SiC به عنوان یک نیمه هادی ذاتی ظرفیت جذب EM را از طریق تطابق امپدانس در لایه‌های میانی افزایش می‌دهد. بعلاوه استفاده از نوع تجاری این پرکننده‌ها موجب کاهش قیمت و افزایش کاربرد صنعتی پوشش‌ها می‌گردد. بنابر این استفاده همزمان پرکننده‌های CNT، SiC و CI در یک ساختار چند لایه با چیدمان کاهش تدریجی غلظت از بالا به پایین بر اساس ساختار نمونه ۱۴ نتایج بهینه‌ای را برای خواص کلیدی مورد انتظار حاصل می‌نماید.

در برخورد موج الکترومغناطیسی ورودی با ساختارهای جاذب چند لایه به لحاظ عدم تطابق لایه‌های مختلف، انعکاس‌های چند گانه بین لایه‌ای به وجود می‌آید که در این شرایط چند پدیده اتفاق می‌افتد: الف) در اثر اختلاف فازی که بین امواج برگشتی

هزینه تقریبی، چگالی وزنی، درصد پرکننده جاذب، میانگین جذب، پهنای باند جذب و بیشینه جذب در جدول ۳ ارائه گردیده است. در این پژوهش نمونه‌های فاقد CNT به عنوان نمونه‌های با هزینه پایین، نمونه‌های تک پرکننده جاذب حاوی CNT به عنوان نمونه‌های گران و نمونه‌های دارای CNT به همراه پرکننده‌های تجاری CI و SiC با عنوان نمونه‌های با هزینه متوسط فرض گردیده‌اند. همانطور که در جدول ۳ آمده است هر کدام از نمونه‌های تک لایه تک پرکننده جاذب دارای معایب و مزایایی می‌باشند. بطور مثال نمونه‌های حاوی CNT تنها دارای حداقل درصد پرکننده جاذب و چگالی هستند ولی متقابلاً دارای هزینه بالا، پهنای باند جذب پایین و بیشینه RL پایین هستند. نمونه‌های حاوی SiC تنها دارای هزینه نسبی پایین، چگالی پایین و درصد پرکننده جاذب متوسط هستند ولی آنها دارای معایبی مانند بیشینه جذب پایین و پهنای باند پایین هستند. بعلاوه، نمونه‌های حاوی CI تنها دارای بالاترین بیشینه جذب، پهنای باند جذب متوسط و هزینه نسبی پایین می‌باشند در حالیکه دارای بیشترین چگالی وزنی و درصد پرکننده جاذب هستند که می‌تواند کاربرد آن را محدود نماید. عموماً خواص جذب ریزموج جاذب‌ها ناشی از تلفات الکتریکی و



شکل ۱۱: ساختار طرح واره نمونه ۱۸ و سازوکار برهم کنش موج EM با آن



شکل ۱۲: مقایسه مشخصه‌های کلیدی سه نمونه تک لایه (۱۶)، چند لایه (۱۴) و چند لایه حاوی FSS (۱۸)

و ورودی به وجود می‌آید، در اثر تداخل تخریبی بخشی از موج مستهلک می‌گردد. (ب) در اثر انعکاس‌های چند گانه بوجود آمده، در کل طول مسیر موج ورودی افزایش یافته و این امر موجب افزایش اندرکنش موج ورودی با مواد جاذب داخل لایه‌ها گردیده که متعاقباً به افزایش میرایی موج منجر می‌گردد. میزان و بزرگی انعکاس‌های بین لایه‌ای به میزان عدم انطباق امپدانس لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها بستگی دارد. از طرف دیگر عمق نفوذ موج الکترومغناطیسی ورودی در لایه‌ها در درجه اول به تطابق امپدانس بهینه لایه اول با هوا و سپس کاهش تدریجی امپدانس از لایه‌های بالا به پایین بستگی دارد. لذا استفاده هم افزا از سه پرکننده جاذب مورد نظر و ساختار چند لایه، موجب افزایش تلفات EM در عمق پوشش می‌گردد. از طرفی تلفات سلفی، خازنی و مقاومتی استفاده از آرایه‌های FSS یک پدیده سطحی است. لذا در این پژوهش با مشارکت دادن آرایه FSS در بین لایه‌های نمونه‌های جاذب می‌توان ضخامت پوشش و تعداد لایه‌های آن را به شرط ثابت نگه داشتن خواص بهینه الکترومغناطیسی متعادل نمود.

روی انواع سامانه‌ها دچار ترک خوردگی و در نتیجه کنده شدن از سطح زیرآیند می‌گردند. لذا یکی از راه‌های رفع این مشکل استفاده از عوامل مسلح در لایه پوششی می‌باشد. FSS استفاده شده در این پژوهش به لحاظ منسوج پایه بودن آن علاوه بر بهبود خواص الکترومغناطیسی می‌تواند قابلیت بهبود خواص مکانیکی نیز داشته باشد. شکل ۱۳ خواص مکانیکی شامل ازدیاد طول (%، مقاومت کششی (MPa)، مدول (MPa) و تافنس (J) نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل کاملاً مشخص است نمونه فاقد FSS دارای پایینترین مقادیر برای خواص مذکور می‌باشد (به ترتیب ۰۹/۷۲، ۲۳/۴۴، ۲۴۰/۸۰ و ۴۷۴۸/۰۵). در حالیکه این مقادیر برای نمونه حاوی یک لایه FSS بطور مشخص افزایش یافته است (به ترتیب ۰۹/۹۸، ۲۴/۲۴، ۲۴۴/۱۴ و ۵۰۰۰/۱۵). به این ترتیب افزایش مقادیر مذکور برای نمونه حاوی دو لایه FSS (به ترتیب ۱۰/۱۵، ۲۵/۰۰، ۲۴۶/۱۳ و ۵۴۹۵/۷۰) کاملاً مشهود است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور رسیدن به پوشش‌های جاذب با میزان جذب و پهنای باند جذب بالا، چگالی نسبی، ضخامت و هزینه پایین، پنج نوع از پوشش‌های جاذب ریزموج بر پایه اپوکسی تهیه و مورد بررسی قرار گرفت:

۳-۶- بررسی خواص مکانیکی

پوشش‌های جاذب ریزموج معمولی به لحاظ داشتن ضخامت و درصد پرکننده جاذب بالا دارای خواص مکانیکی پایینی هستند و لذا در صورت استفاده به عنوان یک لایه پوشش پلیمری بر

جدول ۳: مقایسه نتایج مشخصه‌های کلیدی حاصله از نمونه‌های این پژوهش

شماره نمونه	بیشینه جذب (dB)(A%)	فرکانس بیشینه جذب (GHz)	پهنای باند جذب (RL<-5dB) (A%>68.8)	میانگین جذب (dB)(A%)	پرکننده جاذب %	چگالی (gr/cm ³)	ضخامت (mm)	هزینه تقریبی
۱	۸/۵۹(۸۶/۱۶)	۱۵/۵	۶/۵۰	۳/۹۰(۴۷/۰۰)	۳/۰۰	۱/۰۵	۲	بالا
۲	۵/۷۵(۷۳/۸۷)	۷/۹۱	۳/۰۰	۳/۲۶(۴۵/۴۲)	۵/۰۰	۱/۰۳	۲	بالا
۳	۷/۹۸(۸۴/۰۸)	۹/۰۸	۳/۳۰	۲/۵۰(۳۶/۲۳)	۷/۰۰	۱/۰۸	۲	بالا
۴	۵/۰۸(۷۵/۳۴)	۱۵/۵	۲/۲۰	۳/۷۰(۵۳/۲۱)	۳۰/۰۰	۱/۳۴	۲	پایین
۵	۵/۸۲(۷۹/۲۰)	۱۳/۷۰	۵/۰۰	۳/۹۰(۵۶/۰۰)	۴۰/۰۰	۱/۴۱	۲	پایین
۶	۴/۸۶(۷۴/۶۰)	۱۳/۷۰	۰/۰۰	۳/۳۰(۵۰/۳۳)	۵۰/۰۰	۱/۵۲	۲	پایین
۷	۱۷/۷۱(۹۸/۳۱)	۹/۷۰	۱۲/۳۰	۷/۴۲(۷۲/۲۱)	۶۰/۰۰	۲/۱۰	۲	پایین
۸	۲۲/۵۳(۹۹/۴۴)	۸/۴۰	۱۳/۰۰	۸/۳۳(۸۵/۳۰)	۷۰/۰۰	۲/۶۵	۲	پایین
۹	۱۹/۴۷(۹۸/۹۴)	۴/۹۰	۱۵/۱۵	۸/۱۴(۸۴/۶۴)	۸۰/۰۰	۳/۳۷	۲	پایین
۱۰	۵/۰۸(۷۹/۸۶)	۱۷/۸۰	۰/۱۰	۳/۷۰(۵۷/۳۷)	۲۲/۵۰	۱/۳۰	۲	متوسط
۱۱	۲۲/۰۱(۹۹/۳۷)	۷/۳۲	۱۱/۱۰	۷/۲۸(۸۱/۲۹)	۳۷/۵۰	۲/۲۰	۲	متوسط
۱۲	۵/۲۰(۷۵/۴۵)	۱۱/۴۰	۲/۰۰	۴/۳۶(۶۳/۳۹)	۱۸/۹۵	۱/۳۰	۲	متوسط
۱۳	۱۵/۲۰(۹۶/۹۸)	۸/۴۹	۱۳/۰۰	۷/۴۸(۸۲/۱۱)	۳۸/۱۳	۱/۷۲	۲	متوسط
۱۴	۱۷/۶۰(۹۷/۸۱)	۸/۵۰	۱۴/۱۷	۸/۶۷(۸۶/۴۱)	۳۱/۰۵	۱/۶۱	۲	متوسط
۱۵	۱۱/۶۱(۹۳/۱۰)	۱۵/۵۰	۷/۲۰	۰۵/۱۴(۶۹/۳۶)	۳۸/۱۳	۱/۷۲	۲	متوسط
۱۶	۱۱/۷۱(۹۳/۲۶)	۱۶/۱۰	۵/۴۰	۰۴/۷۵(۶۶/۴۹)	۳۸/۱۳	۱/۷۲	۲	متوسط
۱۷	۳۷/۳۶(۹۹/۹۸)	۱۵/۲۹	۱۳/۴۶	۱۰/۳۴(۹۰/۷۴)	۳۱/۱۰	۱/۷۳	۲	متوسط
۱۸	۵۰/۸۰(۹۹/۹۹)	۱۴/۲۹	۱۴/۲۳	۱۷/۳۸(۹۸/۱۷)	۳۱/۰۵	۱/۷۱	۲	متوسط

نظر، نمونه شماره ۱۶ بصورت تک لایه و حاوی ترکیبی از سه پرکننده جاذب مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت. برای این نمونه پهنای باند با RL بزرگتر از ۵ dB، بیشینه RL و چگالی وزنی به ترتیب ۰.۵/۴۰ GHZ (۱۸/۰۰ - ۱۲/۶۰ GHz)، ۱۱/۷۱ dB و $1/72 \text{ gr/cm}^3$ بدست آمد.

در مقایسه با نمونه ۱۶ نمونه ۱۳ (نمونه چند لایه حاوی CNT، SiC و CI در ۹ لایه و هر لایه حاوی یک نوع پرکننده جاذب) با درصد پرکننده جاذب و ضخامت کلی یکسان، بهبود قابل ملاحظه‌ای در خواص الکترومغناطیسی نشان داد. برای این نمونه پهنای باند با RL بزرگتر از ۵ dB و بیشینه RL به ترتیب ۱۳/۰۰ GHZ (۱۸/۰۰ - ۵/۰۰ GHz) و ۱۵/۲۰ dB بدست آمد.

به منظور رسیدن به خواص الکترومغناطیسی بهتر، در نمونه ۱۴ دو لایه رزین فاقد پرکننده جاذب بدون افزایش ضخامت کل به نمونه ۱۳ اضافه گردید. با وجود ثابت بودن ضخامت و کاهش مقدار جزئی از درصد پرکننده جاذب، بهبود بیشتری در خواص جذب الکترومغناطیسی پوشش حاصل گردید. برای این نمونه پهنای باند با RL بزرگتر از ۵ dB، بیشینه RL و چگالی وزنی به ترتیب ۱۴/۱۷ GHZ (۱۸/۰۰ - ۰۳/۸۳ GHz)، ۱۷/۶۰ dB و $1/61 \text{ gr/cm}^3$ بدست آمد.

با منظور کاهش لایه‌های پوشش که به لحاظ استفاده صنعتی و تجربی دارای پیچیدگی‌های خاص، زمانبر و مشکل آفرین می‌باشد. مشروط به عدم افزایش ضخامت و حفظ خواص جذب الکترومغناطیسی، در نمونه های ۱۷ و ۱۸ از آرایه FSS منسوج پایه استفاده گردید. در این نمونه ها به جای ۹ لایه از سه لایه حاوی ترکیب هرسه پرکننده جاذب استفاده گردید. در نمونه ۱۷ یک لایه و در نمونه ۱۸ دولا لایه FSS مقاومتی منسوج پایه استفاده گردید. برای نمونه ۱۸ به عنوان نمونه بهینه و نهایی، پهنای باند

۱- پوشش‌های تک لایه حاوی یک نوع از پرکننده‌های CNT، SiC و CI از هر کدام در سه غلظت

۲- پوشش تک لایه حاوی متوسط غلظت هرسه پرکننده جاذب مذکور

۳- پوشش‌های چند لایه و هر لایه حاوی یک پرکننده جاذب

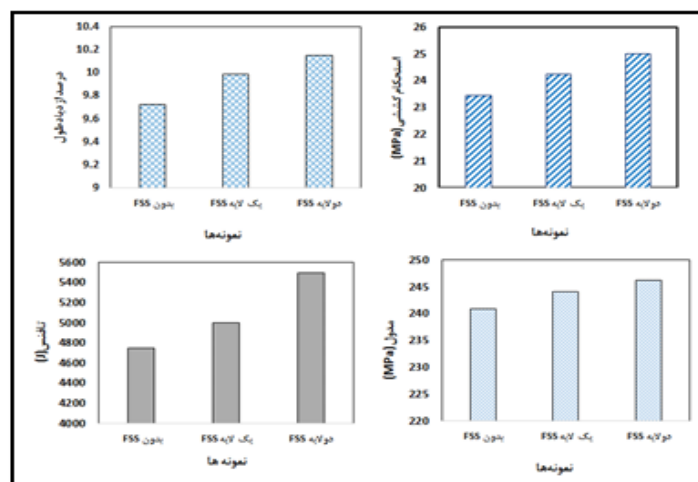
۴- پوشش‌های چند لایه و هر لایه حاوی ترکیبی از پرکننده‌ها (به ترتیب افزایش غلظت از لایه بالا به لایه پایین)

۵- پوشش‌های چند لایه و هر لایه حاوی ترکیب پرکننده‌ها و استفاده آرایه FSS بین لایه‌ای

خواص الکترومغناطیسی هر نمونه مانند میزان جذب، بیشینه RL، پهنای باند جذب و مشخصه‌های دیگر پوشش مانند چگالی وزنی، ضخامت، درصد پرکننده جاذب و هزینه نسبی مورد بررسی قرار گرفت.

بطور کلی، پوشش‌های تک لایه حاوی یک نوع پرکننده جاذب، متناسب با پرکننده جاذب مورد استفاده هر کدام دارای نقاط قوت و ضعف بودند. پوشش‌های حاوی CNT با وجود داشتن چگالی و درصد پرکننده جاذب پایین، دارای هزینه بالا، بیشینه جذب متوسط و متناسب با غلظت پرکننده جاذب استفاده شده قابل استفاده برای محدوده فرکانسی متوسط و بالا بود. پوشش‌های حاوی SiC علی‌رغم داشتن چگالی نسبی و هزینه پایین دارای بیشینه جذب پایین و محدود به استفاده برای بازه‌های فرکانسی متوسط و بالا بود. پوشش‌های حاوی CI در مقایسه با پوشش‌های حاوی CNT و SiC، بیشینه RL بالایی نشان می‌دهد و متناسب با غلظت مورد استفاده برای بازه‌های فرکانسی متوسط و پایین مناسب می‌باشد. چگالی نسبی و درصد پرکننده جاذب بالای این پوشش، استفاده آن را برای بسیاری از کاربردها محدود می‌سازد.

برای رسیدن به خواص الکترومغناطیسی و فیزیکی مورد



شکل ۱۳: خواص مکانیکی پوشش‌های فاقد FSS، حاوی یک لایه FSS و حاوی دو لایه FSS

۵- مراجع

- [1] Quan, B., Liang, X., Ji, G., Cheng, Y., Liu, W., Ma, J., Xu, G. (2017). Dielectric polarization in electromagnetic wave absorption: review and perspective. *Journal of Alloys and Compounds*.
- [2] Huo, J., Wang, L., Yu, H. (2009). Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption. *Journal of materials science*, 44(15), 3917-3927.
- [3] Su, X., Jia, Y., Wang, J., Xu, J., He, X., Fu, C., Liu, S. (2013). Preparation and microwave absorption properties of Fe-doped SiC powder obtained by combustion synthesis. *Ceramics International*, 39(4), 3651-3656.
- [4] Liu, Y., Liu, X., Wang, X. (2014). Double-layer microwave absorber based on CoFe₂O₄ ferrite and carbonyl iron composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 249-253.
- [5] Serp, P., M. Corrias, and P. Kalck, Carbon nanotubes and nano-fibers in catalysis. *Applied Catalysis A: General*, 2003. 253(2): p. 337-358.
- [6] Panwar, R., Lee, J. R. (2017). Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review. *Aerospace Science and Technology*, 66, 216-234.
- [7] Gao, Y., Gao, X., Li, J., Guo, S. (2018). Improved microwave absorbing property provided by the filler's alternating lamellar distribution of carbon nanotube/carbonyl iron/poly (vinyl chloride) composites. *Composites Science and Technology*, 158, 175-185.
- [8] Yang- Bao Feng, Tai Qiu, Chun- Ying Shen, and Xiao- Yun Li, "Electromagnetic and Absorption Properties of Carbonyl Iron/ Rubber Radar Absorbing Materials," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 42, no. 3, pp. 363-368, 2006.
- [9] Wang Meng, Duan Yuping, Liu Shunhua, Li Xiaogang, Ji Zhijiang, "Absorption properties of carbonyl-Iron/carbon black double-layer microwave absorbers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 321, pp. 3442-3446, 2009.
- [10] Yong Li, Changxin Chen, Xiaoyan Pan, Yuwei Ni, Song Zhang, Jie Huang, Da Chen and Yafei Zhang., "Multiband Microwave Absorption Films Based on Defective Multiwalled Carbon Nanotubes Added Carbonyl Iron/Acrylic Resin," *Physica B*, vol. 404, pp. 1343-1346, 2009.
- [11] S. T. Jiang and W. Li, "Condensed magnetic Matter," Beijing, China: Science Press, pp. 402-417, 2003.
- [12] Meshram MR, Agrawal Nawal K, Sinha Bharoti, Misra PS, "Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber," *J. Magn Magn. Mater.*, vol. 271, pp. 207-214, 2004.
- [13] Y. Qing, X. Wang, Y. Zhou, Z. Huang, F. Luo, W. Zhou, "En-

با RL بزرگتر از ۵ dB، بیشینه RL و چگالی وزنی به ترتیب $14/23$ GHz ($0.3/77-18/00$ GHz)، ۵۰/۸۰ dB و $50/80$ gr/cm³ بدست آمد.

در این پژوهش ضخامت کل نمونه‌ها ثابت و به چند دلیل ۲ لحاظ گردید: الف) با وجود جهت گیری پژوهش‌های دانشمندان برای طراحی جاذب‌های ریز موج با حداقل ضخامت، غالب ضخامت‌های کار شده اخیر پژوهشگران در محدوده ۴-۱/۵ mm بوده است که در این میان ضخامت ۲ mm با میزان تلفات انعکاسی بهینه و به لحاظ سهولت کاربری صنعتی ارجحیت بیشتری داشته است. ب) امکان لحاظ نمودن ضخامت کمتر از ۲ mm با توجه به ساختار لایه‌ای پوشش و قرار دادن دولایه FSS منسوج پایه در میان لایه‌ها، بنابر الزام قابلیت استفاده صنعتی و حفظ تلفات انعکاسی بهینه، کمتر است.

برای تحلیل نتایج حاصله در این پژوهش چند نکته قابل ذکر است: ۱- استفاده از ساختارهای با کاهش تدریجی امپدانس از لایه‌های بالا به پایین اجازه ورود حداکثری به امواج EM داده و انعکاس از لایه اول را به حداقل رساند.

۲- استفاده از ساختارهای چند لایه و لایه‌های فاقد پرکننده جاذب در میان آنها از طریق ایجاد بازتاب‌های چندگانه بین لایه‌ای موجب استهلاک بیشتر موج گردیده که منجر به افزایش کلی میزان جذب گردید.

۳- استفاده هم زمان از پرکننده‌ها ی دی‌الکتریک و مغناطیسی موجب افزایش پهنای باند گردید.

۴- استفاده از آرایه‌های منسوج پایه FSS از طریق ایجاد تلفات اهمی و سلفی سطحی منجر به کاهش لایه‌ها و افزایش پهنای باند جذب گردید.

۵- استفاده از FSS به عنوان عامل مسلح در رنگپایه پلیمری علاوه بر افزایش خواص جذب الکترومغناطیسی، بهبود خواص مکانیکی پوشش را به همراه داشته است.

۶- رزین اپوکسی دوجزئی به لحاظ داشتن مقاومت‌های شیمیایی، فیزیکی و فرایند پذیری خوب کاندید مناسبی برای استفاده از آن به عنوان رنگپایه پوشش جاذب مورد نظر می‌باشد.

hanced microwave absorption of multiwalled carbon nano tubes/epoxy composites incorporated with ceramic particles,” Compos. Sci. Technol., vol. 102, pp. 161-168, 2014.

[14] Bi, S., Su, X., Hou, G., Liu, C., Song, W. L., Cao, M. S. (2013). Electrical conductivity and microwave absorption of shortened multi-walled carbon nanotube/alumina ceramic composites. Ceramics International, 39(5), 5979-5983.