



## پوشش‌های کامپوزیتی جاذب امواج الکترومغناطیس: عوامل فرآیندی و ساختاری مواد تشکیل‌دهنده

- سید محمد معروفی<sup>۱</sup>، علی اصغر صباغ الوانی<sup>۲\*</sup>، حسن سامعی<sup>۳</sup>، حمیدرضا هدایتی<sup>۴</sup>، رضا سلیمی<sup>۴</sup>، سعید حسینی<sup>۱</sup>، خسرو مرادی<sup>۴</sup>
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۳- دانشیار، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۴- دانشجوی دکترا، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۵- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۱۸ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۴/۴/۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۳۰ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۴/۴/۳۰

### چکیده

پوشش‌های کامپوزیتی جاذب امواج الکترومغناطیس از جمله فناوری‌های جدیدی محسوب می‌شوند که کاربردهای گسترده‌ای در صنایع نظامی، ساخت و تولید آنتن، محافظت از انسان‌ها و مواد زیستی در برابر مضرات امواج الکترومغناطیس، بهبود سازگاری الکترومغناطیسی بین دستگاه‌های مختلف الکترونیکی و غیره پیدا کرده‌اند. از آنجایی که امواج الکترومغناطیس شامل دو مولفه الکتریکی و مغناطیسی می‌باشند، پوشش‌های کامپوزیتی جاذب امواج الکترومغناطیس لازم است تا هم‌زمان جذب مغناطیسی و الکتریکی را بصورت اتلاف داشته باشند. فریت‌ها دسته‌ای از مواد معدنی هستند که در پوشش‌های کامپوزیتی جاذب امواج الکترومغناطیس به کار می‌روند. این مواد اتلاف مناسبی برای مولفه مغناطیسی از خود نشان می‌دهند. از سوی دیگر به منظور اتلاف مولفه الکتریکی، از ترکیبات بر پایه کربن در این پوشش‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. همچنین تلقیح یون‌های ناخالصی به ساختار فریت‌های مورد استفاده در این پوشش‌های کامپوزیتی‌ها، ضمن بهبود خواص جذبی مولفه الکتریکی امواج الکترومغناطیس، می‌تواند نیاز به استفاده از ذرات بر پایه کربن را کمتر نماید.

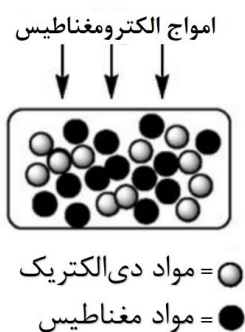
### واژه‌های کلیدی

جاذب الکترومغناطیس، پوشش‌های کامپوزیتی، مایکروویو، مغناطیس، الکتربسیته، اتلاف امواج.

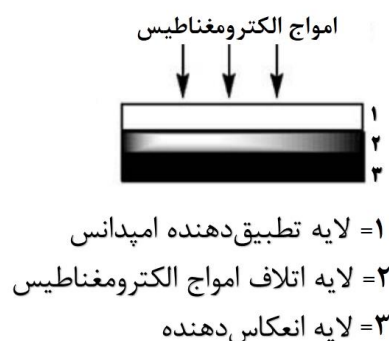
### چکیده تصویری

## دو ساختار کامپوزیت‌های جاذب امواج الکترومغناطیس

### اختلاط فیزیکی



### ساختار چند لایه





## Electromagnetic wave absorbing composite coatings: Structural and process parameters

S. M. Maroofi<sup>1,2</sup>, A. A. Sabbagh Alvani<sup>2\*</sup>, H. Sameie<sup>2</sup>, H. R. Hedayati<sup>1,2</sup>, R. Salimi<sup>2</sup>, S. Hosseini<sup>1,2</sup>, Kh. Moradi<sup>1,2</sup>

1- Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, P. O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

2- Color and Polymer Research Center (CPRC), Amirkabir University of Technology, P. O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

### Abstract

Recently the electromagnetic wave absorbing composite coatings are widely used in military industries, antenna techniques and production barriers, for protection of humans and other biological objects from the harmful effects of the electromagnetic waves and also to improve electromagnetic compatibility between different electronic devices. Both electrical and magnetic components should be absorbed together in microwave absorber composite coatings. Such absorption is known as "electrical loss" and "magnetic loss". As a result, to make an absorber composite coating it is necessary functional pigments have both electrical and magnetic loss. Ferrites provide suitable absorption properties for magnetic component in microwave absorber composite coatings. On the other hand, the electrical absorption characteristics can be improved through dopping the additional ions instead of using carbon based compounds.

### Keywords

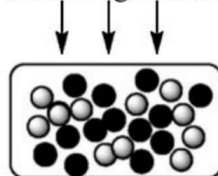
Electromagnetic absorber, Composite coatings, Microwave, Magnetic, Electricity, Wave loss.

### Graphical abstract

#### The two structures for electromagnetic wave absorption composites

##### physical blend

electromagnetic wave

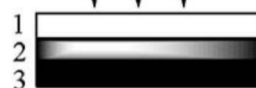


○ = dielectric material

● = magnetic material

##### multilayer structure

electromagnetic wave



1=impedance matching layer

2= electromagnetic wave loss layer

3= reflective layer

۱- مقدمه

روابط آنها برای مولفه الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب، به صورت روابط ۱ و ۲ می‌باشد.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (۱)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (۲)$$

( $\epsilon'$ ) و ( $\mu'$ ) به ترتیب بخش حقیقی گذردهی الکتریکی مختلط و بخش حقیقی نفوذپذیری مغناطیسی مختلط می‌باشند که نشان‌دهنده میزان کمی انرژی ذخیره شده از یک میدان متناوب در یک ماده هستند. بخش موهومی این روابط یعنی ( $\epsilon''$ ) و ( $\mu''$ )، بیانگر میزان اتلاف الکتریکی و مغناطیسی این میدان است. همچنین تانژانت<sup>۸</sup> اتلاف برای هر دو مولفه، نسبت بخش موهومی به بخش حقیقی این ضرایب می‌باشد که روابط ۳ و ۴ به ترتیب برای تانژانت اتلاف الکتریکی و تانژانت اتلاف مغناطیسی بیان می‌شوند [۸].

$$\tan \delta_\epsilon = \epsilon'' / \epsilon' \quad (۳)$$

$$\tan \delta_\mu = \mu'' / \mu' \quad (۴)$$

از سوی دیگر از تانژانت اتلاف این ضرایب می‌توان نتیجه گرفت که هر چه بخش موهومی گذردهی الکتریکی و مغناطیسی بزرگتر باشد، جذب امواج بهتر خواهد بود. در نتیجه، برای جاذب‌های امواج الکترومغناطیس، موادی با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی بالا انتخاب می‌شوند. از سوی دیگر، بخش انعکاسی و عبوری موج برای یک ماده با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی خیلی بالا، نسبتاً بزرگ خواهد بود که بر این اساس، می‌بایست یک گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مناسب با نیاز عملیاتی انتخاب شود. به عبارت دیگر زمانی که مقادیر  $\epsilon'$ ،  $\epsilon''$ ،  $\mu'$  و  $\mu''$  قابل مقایسه هستند ماده رفتار جذبی یا اتلاfi فعال نسبت به امواج ماکروویو از خود نشان می‌دهد [۹-۱۱].

موج الکترومغناطیس<sup>۱</sup> یک موج خود پخش‌شونده در فضا با مولفه‌های مغناطیسی و الکتریکی است. این مولفه‌ها در راستای انتشار نوسان می‌کنند و با یکدیگر در یک فاز هستند. مایکروویوها امواج الکترومغناطیسی با طول موج در محدوده ۱ میلی‌متر تا ۱ متر یا بسامد بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز هستند (شکل ۱-الف) [۱]. به دلیل دو مولفه‌ای بودن امواج الکترومغناطیس (شکل ۱-ب)، بیشتر جاذب‌های مایکروویو از یک بستر پلیمری با خواص الکتریکی و پرنکنده‌هایی با خواص مورد نظر تشکیل شده‌اند [۲]. از جمله کاربردهای مواد جاذب الکترومغناطیس می‌توان به فناوری آنتن و تولید آن، محافظت انسان‌ها و مواد زیستی در برابر مضرات امواج الکترومغناطیس، کاربردهای نظامی (استتار ضدراداری) و بهبود سازگاری الکترومغناطیس بین وسایل الکترونیکی اشاره کرد. انواع مختلفی از پوشش‌های کامپوزیتی با رفتار جذبی فعال مایکروویو در سال‌های گذشته برای کاربرد واقعی و تجاری از قبیل مایعات با کاربردهایی نظیر پوشش‌های<sup>۳</sup>، پوشش‌های<sup>۴</sup> چندلایه انعطاف‌پذیر، ترکیب نساجی و لاستیک<sup>۵</sup> توسعه یافته و بررسی شده‌اند [۶-۷].

مهم‌ترین مشخصه‌های رفتار مواد در برابر امواج الکترومغناطیس شامل موارد زیر است:

۱- گذردهی الکتریکی مختلط<sup>۵</sup>

۲- نفوذپذیری مغناطیسی مختلط<sup>۶</sup>

تمام اندازه‌گیری‌ها با فرض آن انجام می‌گیرد که به هنگام اعمال میدان الکترومغناطیس به یک ماده، این ماده مقداری از مولفه‌های الکتریکی و مغناطیسی آن را اتلاف<sup>۷</sup> کرده و سپس با یک تاخیر به میدان پاسخ می‌دهد. این بدان معناست که گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی می‌بایست به شکل عوامل مختلط در نظر گرفته شوند، که

<sup>1</sup> Electromagnetic

<sup>2</sup> Paint

<sup>3</sup> Coatings

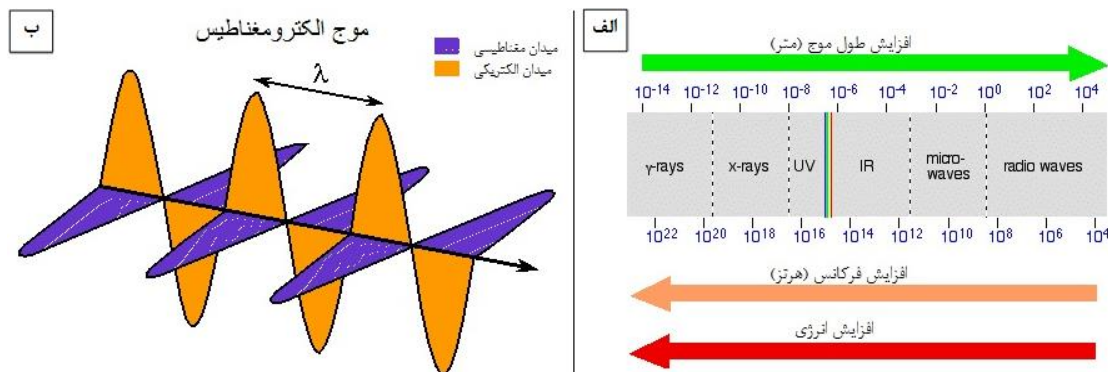
<sup>4</sup> Rubber

<sup>5</sup> Complex permittivity

<sup>6</sup> Complex permeability

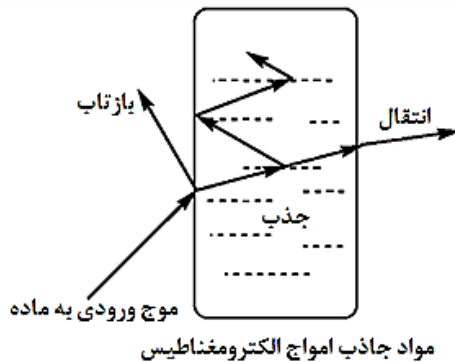
<sup>7</sup> Loss

<sup>8</sup> Tangent



شکل ۱- الف) شمای کلی محدوده امواج و طول موج‌های آنها ب) شمای کلی امواج الکترومغناطیس و مولفه‌های آن.

انرژی امواج جذب شده باشند. در نتیجه ساختار پوشش‌های کامپوزیتی جاذب موثر، زمانی قابل قبول است که هم‌زمان دارای انعکاس کم، انتقال حداقل و جذب حداکثر باشد [۱].



شکل ۲- فرآیندهای کلی یک موج ورودی به داخل مواد جاذب امواج الکترومغناطیس [۱۰].

## ۲- بررسی اثر عوامل فرآیندی بر خواص جذب الکترومغناطیس

برای ساخت رنگدانه‌های<sup>۶</sup> رنگی معدنی<sup>۷</sup> مختلط از دو روش کلی سرامیکی [۱۹-۱۳] و شیمی تر [۲۵-۲۰ و ۱۴، ۱۳] استفاده می‌شود. در روش سرامیکی، اکسید فلزات<sup>۸</sup> مختلف به کمک آسیا با یکدیگر مخلوط شده، پودر حاصل تحت عملیات حرارتی<sup>۹</sup> قرار می‌گیرد که طی آن در دماهای بسیار بالا و زمان‌های بسیار طولانی مواد اولیه با یکدیگر واکنش شیمیایی می‌دهند تا یون‌های موجود در ترکیب به یک آرایش بلوری نسبتاً پایدار دست یابند [۲۶]. در این روش به دلیل ایجاد محصولات جانبی، خلوص محصول مطلوب نسبتاً پایین است. علاوه بر این دمای بالا و زمان طولانی مورد نیاز برای انجام واکنش هزینه زیادی را برای تهیه رنگدانه تحمیل می‌کند. به منظور غلبه بر این معایب تمایل به استفاده از روش‌های شیمی تر گسترش یافت. در این روش‌ها که می‌توان به روش‌هایی نظیر هم‌رسوبی<sup>۱۱</sup> [۱۵]، سل ژل<sup>۱۱</sup> [۲۱]، پیش‌ساز پلیمری<sup>۱۲</sup>، هیدروترمال<sup>۱۳</sup> [۲۰]، احتراقی<sup>۱۴</sup> و غیره اشاره کرد، به دلیل استفاده از یک محیط مایع، اجزای تشکیل دهنده در مقیاس مولکولی با یکدیگر ترکیب می‌شوند بنابراین احتیاجی به دماهای بالا برای تشکیل فاز بلوری نخواهد بود. رنگدانه به‌دست آمده از این روش‌ها خلوص بلوری بالاتر، یکنواختی بیشتر و اندازه ذرات کوچک‌تری خواهد داشت [۲۷-۲۹]. اما عمده‌ترین مزیت روش‌های ساخت شیمی تر استفاده از عوامل فرآیندی

۳- امیدانس موج<sup>۱</sup>

در نقطه‌ای از یک موج الکترومغناطیس نسبت قدرت میدان الکتریکی به میدان مغناطیسی را امیدانس گویند که با رابطه ۵ بیان می‌شود. که بر طبق این قانون وقتی که نفوذپذیری مغناطیسی معادل با گذردهی الکتریکی مواد می‌گردد، انعکاسی وجود نخواهد داشت و جذب<sup>۲</sup> امواج الکترومغناطیس در بالاترین حالت خواهد بود [۱۱].

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (5)$$

۴- جذب الکترومغناطیس یا اتلاف بازتابی<sup>۳</sup>

مهم‌ترین مشخصه مورد بررسی که متاثر از سایر موارد ذکر شده است، پارامتر اتلاف بازتابی می‌باشد که غالباً خاصیت جذب امواج الکترومغناطیس با اتلاف بازتابی تعیین می‌گردد. رابطه اتلاف بازتابی به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$RL(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (6)$$

که  $Z_{in}$ ، امیدانس موج ورودی می‌باشد و به صورت رابطه ۷ است.

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} f d \right] \quad (7)$$

که  $\mu_r$ ،  $\epsilon_r$ ،  $f$ ،  $d$  و  $Z_0$  در این رابطه به ترتیب نمایانگر نفوذپذیری مغناطیسی، گذردهی الکتریکی، سرعت امواج الکترومغناطیس در خلا، بسامد<sup>۴</sup>، ضخامت جاذب و امیدانس موج در هوا هستند. برای مثال، مقادیر ۱۰ و ۲۰ دسی بل<sup>۵</sup> به‌دست آمده برای اتلاف بازتابی نشان می‌دهد که به ترتیب، ۹۰٪ و ۹۹٪ موج الکترومغناطیس به وسیله ماده جذب شده است [۱۱، ۱۲].

۵- تعادل بین انرژی جذب شده، بازتاب شده و عبور کرده همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، این ویژگی بر اساس رابطه ۸ بیان می‌شود که در آن  $P_a$ ،  $P_r$  و  $P_t$  به ترتیب نشان‌دهنده انرژی موج عبور کرده، بازتاب شده و جذب شده می‌باشند.

$$P_r + P_a + P_t = 1 \quad (8)$$

با استدلال به رابطه ۸ می‌توان بیان کرد، برای افزایش جذب در مواد جاذب باید انرژی امواج عبور کرده و بازتاب شده کاهش یافته، و کمتر از

<sup>6</sup> Pigments

<sup>7</sup> Inorganic

<sup>8</sup> Metal Oxides

<sup>9</sup> Calcination

<sup>10</sup> Co-precipitation

<sup>11</sup> Sol-gel

<sup>12</sup> Pechini

<sup>13</sup> Hydrothermal

<sup>14</sup> Combustion

<sup>1</sup> Wave impedance

<sup>2</sup> Absorption

<sup>3</sup> Reflection loss

<sup>4</sup> Frequency

<sup>5</sup> Decibel

نمونه تهیه شده به روش هم‌رسوبی در مقایسه با نمونه تهیه شده به روش حالت جامد است. همچنین فاز نهایی در روش هم‌رسوبی در دمایی کمتری نسبت به روش حالت جامد تشکیل می‌شود و اندازه ذرات نیز در روش هم‌رسوبی کوچک‌تر هستند. در نتیجه قابل مشاهده است که روش ساخت و شرایط عملیات حرارتی تا چه حد می‌تواند بر روی خواص اتلافی پودرهای ساخت شده موثر باشد که این مسئله متناسب با نوع کاربرد اهمیت مضاعفی خواهد داشت. به منظور بررسی خواص دی الکتریکی در بسامدهای بالا (گذردهی الکتریکی و تانژانت اتلاف) از روش صفحه موازی که در شکل ۴ نمای کلی از آن نشان داده شده است، بهره گرفته شد. بخش حقیق گذردهی الکتریکی ( $\epsilon'$ ) از روی ظرفیت خازن و بخش موهومی ( $\epsilon''$ ) با اندازه‌گیری عامل اتلاف محاسبه می‌گردد. ظرفیت خازن حاضر در شکل ۴، به دلیل مقاومت ظاهری بالا، کم بوده و در نتیجه می‌توان آن را در مدار معادل در نظر گرفت.

<sup>1</sup> Morphology

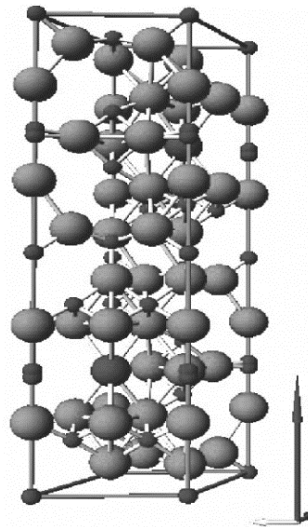
<sup>2</sup> Ferrites

<sup>3</sup> Garnets

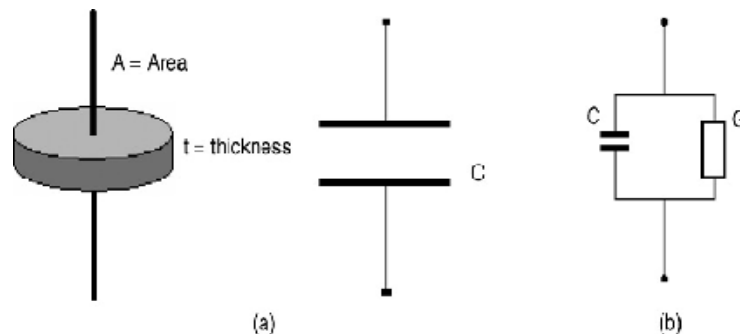
<sup>4</sup> Malic

<sup>5</sup> X-ray diffraction (XRD)

نظیر دما، فشار، pH، زمان، استفاده از مواد کمکی مانند فعال سطح‌ها، نوع و غلظت مواد کمکی و غیره به عنوان ابزاری برای کنترل کیفیت محصول دلخواه می‌باشد. با تغییر این عوامل فرآیندی می‌توان به اندازه و ریز ساختار<sup>۱</sup> دلخواهی از ذرات و بلورک‌ها دست پیدا کرد. فریت‌ها<sup>۲</sup> و گارنت‌ها<sup>۳</sup>، اکسیدهای فرومغناطیسی هستند که ویژگی‌های مناسب الکتریکی و مغناطیسی آنها در محدوده امواج الکترومغناطیسی مایکروویو، به این دسته از مواد امکان استفاده در زمینه‌های کاربردی مختلف را داده است. روش‌های ساخت، در کنار تلقیح ساختاری یون‌هایی نظیر کبالت (Co) و تیتانیوم (Ti) بر روی خواص الکتریکی و مغناطیسی این نوع از مواد موثر می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط مالیک<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۷ انجام گرفت [۸]، پودرهای هگزافریت باریم به دو روش هم‌رسوبی و حالت جامد تهیه شد و ویژگی‌های الکتریکی آنها به عنوان تابعی از شرایط عملیات حرارتی و بسامد مورد ارزیابی قرار گرفت که این مسئله متناسب با نوع کاربرد می‌تواند اهمیت مضاعفی پیدا کند. ساختار بلوری برای این ترکیب در شکل ۳ نشان داده شده است که در آن ۶۴ یون موجود در ساختار در ۱۱ مکان متقارن متفاوت توزیع یافته‌اند. ۲۴ یون از ۶۴ یون موجود مربوط به  $Fe^{3+}$  است و در پنج مکان متقارن (۳ مکان هشت وجهی، ۱ مکان چهار وجهی و ۱ مکان دو هرمی) پخش شده‌اند. نتایج حاصل از الگوهای پراش پرتو ایکس<sup>۵</sup> بیانگر خلوص فازی بیشتر



شکل ۳- ساختار قرارگیری اتم‌های حاضر در  $BaFe_{12}O_{19}$  [۸]



شکل ۴- الف) روش صفحه موازی برای اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی، ب) مدل مدار معادل [۸]

در این شرایط جریان ورودی عبارت خواهد بود از:

$$Y = G + j\omega C \quad (9)$$

$$Y = j\omega \left( \frac{C}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right) C_0 \quad (10)$$

که در آن  $C$  و  $C_0$  ظرفیت خازنی، به ترتیب برای زمانی است که صفحه، ماده و یا هوا باشد. بنابراین گذردهی نسبی الکتریکی مختلط برابر خواهد بود با:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (11)$$

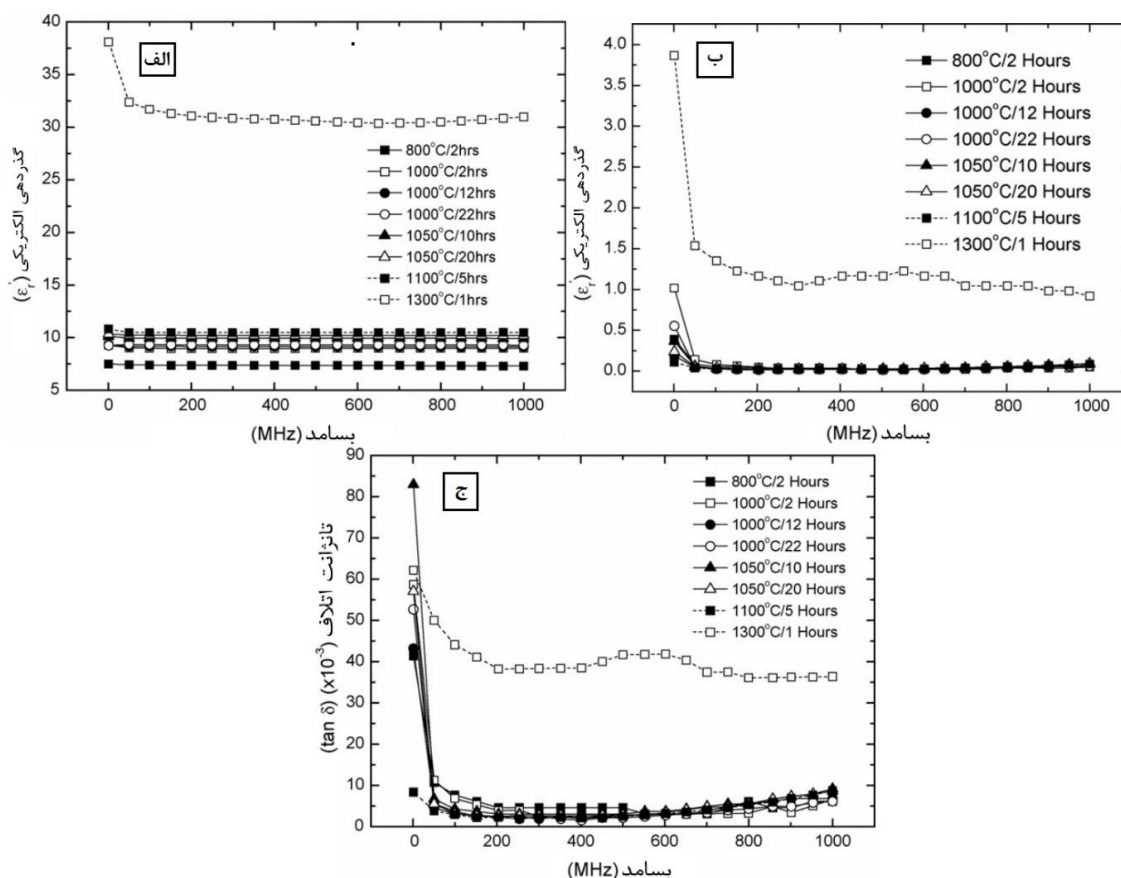
$$\epsilon_r' = \frac{C}{C_0} = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (12)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{t}{\omega \epsilon_0 A R_p} \quad (13)$$

خاطر نشان می‌شود که  $G$ ، عکس  $R_p$ ، ضخامت نمونه و  $A$ ، مساحت سطح آن می‌باشد. خواص دی الکتریک هگزا فربت‌های باریم در دمای اتاق و برای محدوده ۱ مگاهرتز تا ۱ گیگاهرتز بررسی شد. شکل ۵ به ترتیب تغییرات بخش حقیقی و موهومی و تانژانت اتلاف  $\epsilon'$  را برای

هگزا فربت باریم در شرایط عملیات حرارتی مختلف با افزایش بسامد نشان می‌دهد. در این پژوهش مشاهده شد که مقادیر بالای گذردهی الکتریکی مختلط و مقادیر تانژانت اتلاف، تا حد زیادی با بسامد ثابت ماندند اما با افزایش دمای عملیات حرارتی هر دو مقدار به تدریج افزایش داشتند تا اینکه با گذر از دمای ۱۱۰۰ °C به ۱۳۰۰ °C، افزایش چشمگیری برای این مقادیر حاصل شد. بخش حقیقی و موهومی برای نمونه تحت عملیات حرارتی قرار گرفته، در ۱۳۰۰ °C برای ۱ ساعت، به ترتیب حدود ۳۲ و ۱ می‌باشد. بالا بودن بخش حقیقی برای این نمونه می‌تواند به چگالی بالای آن مربوط شود. از سوی دیگر احتمالاً نوآرایی ساختاری اتم‌های آهن و در نتیجه رشد مسیرهای الکترونی توانسته است بر روی مشخصه‌های الکتریکی تاثیر گذار باشد.  $\epsilon'$  بالای به دست آمده به علت ماهیت ذخیره‌کنندگی این پارامتر، قابلیت استفاده از این ماده را در کاربردهای آنتن و از سوی دیگر  $\epsilon''$  بالا نیز به دلیل ماهیت اتلاف‌کنندگی این عامل، قابلیت استفاده از آن را در مواد جاذب نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که در ۱۳۰۰ °C، مقدار تانژانت اتلاف بسیار بالا بوده و تا حدود ۰/۰۳۲۹ رسیده است. هگزا فربت‌های باریم به دلیل مقادیر بالا در مغناطیسی شدن، ناهمسانی مغناطیسی سطحی و همچنین گذردهی مغناطیسی مختلط در محدوده امواج مایکروویو، کاربردهای فراوانی به‌عنوان مواد جاذب یافته‌اند.

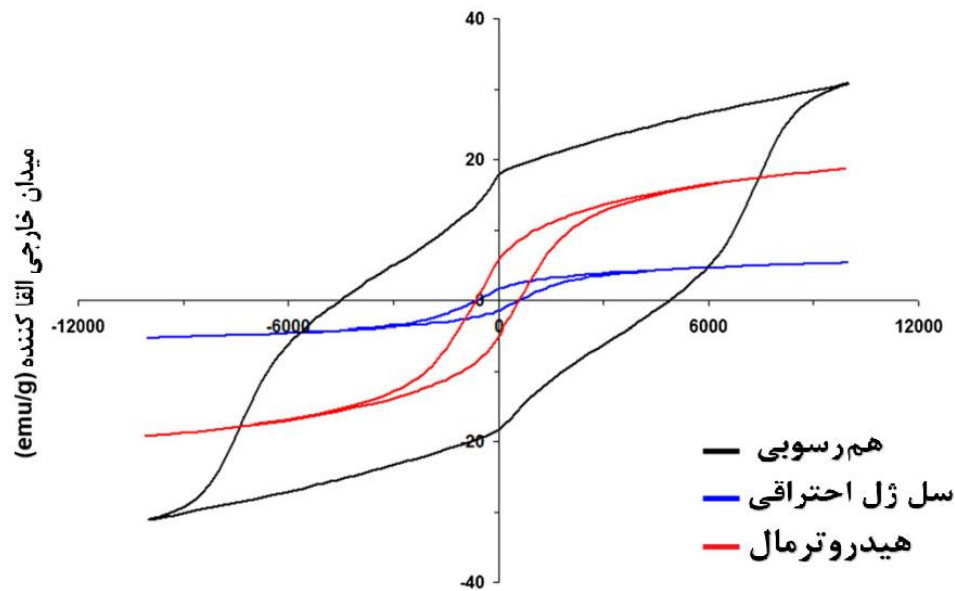
Loss<sup>1</sup>



شکل ۵- الف) تغییرات بخش حقیقی گذردهی الکتریکی با بسامد ب) تغییرات بخش موهومی گذردهی الکتریکی با بسامد ج) تغییرات تانژانت اتلاف با بسامد در شرایط عملیات حرارتی مختلف [۸].

حالی که با روش هم‌رسوبی مواد مغناطیسی سخت حاصل می‌شود. همچنین توزیع اندازه ذرات به‌دست آمده از روش هم‌رسوبی باریک‌تر و یکنواخت‌تر است. در نهایت قابل مشاهده است خواص مغناطیسی و جذب الکترومغناطیس تا چه حد به روش ساخت وابسته‌اند. در پژوهشی دیگر که توسط لایبندی<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۰ انجام گرفت [۳۰]، فریت‌های باریک بر اساس فرمول شیمیایی  $(\text{BaO}_2:n\text{Fe}_2\text{O}_3)$  با اندازه ذرات مختلف به روش سرامیکی ساخت گردید. فرآیند عملیات حرارتی در بازه دمایی ۹۵۰ تا ۱۲۰۰ °C به مدت ۱/۵ تا ۶ ساعت انجام شد. در این پژوهش تلاش شد تا بهترین شرایط ساخت این نوع پودرها از نقطه نظر نسبت مولی برای روش سرامیکی تعیین گردد، مقادیر ۵/۵، ۵/۷ و ۵/۹ برای n در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۷، بهترین خواص مغناطیسی از جمله مغناطیس اشباع و کوئرسیویتی در نسبت مولی معادل با ۵/۷ و ۵/۵ به‌دست آمد.

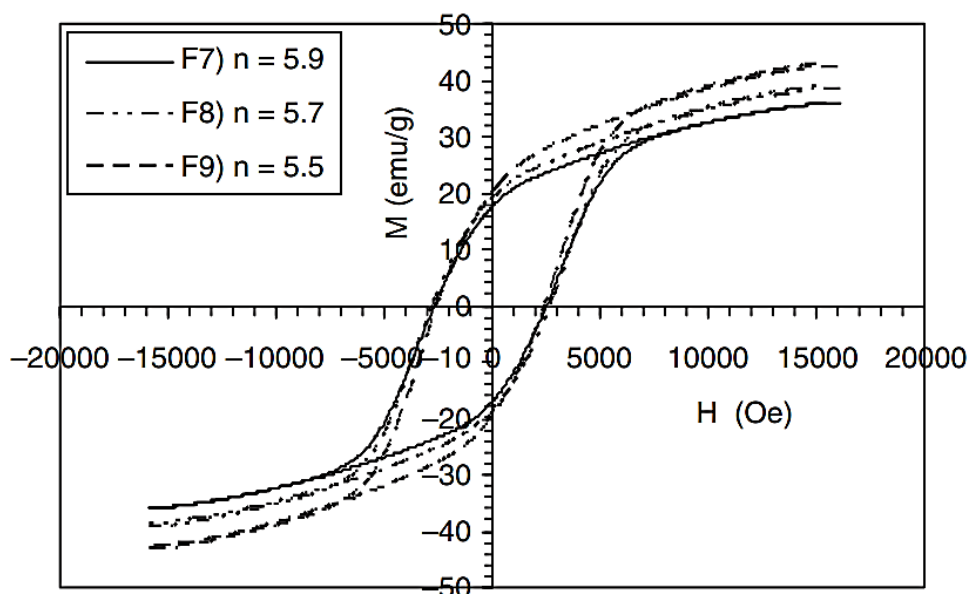
در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۱۲ توسط ابراهیمی و همکارانش صورت گرفت، به بررسی اثر روش‌های ساخت هیدروترمال، سل ژل و هم‌رسوبی روی خواص مغناطیسی، ریز ساختاری و ساختاری ترکیب هگزا فریت استرانسیوم تلقیح شده با کبالت پرداخته شد [۱۴]. نتایج آزمون‌های ساختاری و بلوری نشان داد خلوص فازی مواد فریت به شدت وابسته به روش ساخت است و تفاوت در روش ساخت باعث تغییرات زیادی در عوامل شبکه و اندازه ذرات شده است. این در حالی است که مواد ساخته شده به روش هم‌رسوبی تک فاز و مواد ساخته شده به روش‌های دیگر دارای ناخالصی بودند. خواص مغناطیسی این مواد با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش<sup>۱</sup> (VSM) اندازه‌گیری شد که حلقه‌های پسماند مغناطیسی<sup>۲</sup> آنها در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از نمودارهای شکل ۶ مشخص است فریت ساخت شده به روش هم‌رسوبی بیشترین مقدار مغناطیس اشباع<sup>۳</sup> و کوئرسیویتی<sup>۴</sup> را دارد که اطلاعات استخراج شده از شکل ۶ در جدول ۱ ارائه شده است. حداکثر مغناطیس اشباع (۳۱/۲ emu/g) و حداکثر مقدار کوئرسیویتی (۴۹۵۰ Oe) مربوط به روش هم‌رسوبی می‌باشد که دلیل این موضوع مربوط به خلوص فازی بالاتر، یکنواختی بیشتر و اندازه بلورهای بزرگ‌تر می‌باشد. ظاهراً فریت‌های نرم با روش‌های هیدروترمال و سل ژل قابل دستیابی است در



شکل ۶- حلقه پسماند مغناطیسی برای هگزاگونال فریت ساخت شده به روش‌های مختلف با ساختار  $\text{SrCo}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{O}_{19}$  [۱۴].

جدول ۱- مقادیر مغناطیس اشباع، مغناطیس باقیمانده و کوئرسیویتی نمونه‌های ساخت شده با روش‌های مختلف [۱۴].

روش سنتز	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)	Mr/Ms	Hc (Oe)
سل ژل	۵/۳	۱/۶	۰/۳۰	۶۶۹
هیدروترمال	۱۸/۳	۱۶/۶	۰/۳۶	۶۸۳
هم رسوبی	۳۱/۲	۱۷/۹	۰/۵۷	۴۹۵۰



شکل ۷- حلقه پسماند مغناطیسی باریم فریت ساخته شده در دمای ۱۰۵۰ درجه به مدت ۳ ساعت با نسبت‌های مولی مختلف [۳۰].

مواد نانو ساختار، قادر است اتلاف بالای مغناطیسی و الکتریکی مواد معدنی، سبک بودن و مقاومت پلیمرها را در کنار هم قرار داده و شاید یک راهبرد بهینه برای طراحی مواد جاذب رادار با کارایی بالا، می‌باشد. درموتا<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۳۱]، دو نوع پرکننده مغناطیسی شامل مگنتیت و هگزافریت استرانسیم را به روش هم‌رسوبی تهیه کردند، و تاثیر آنها را بر روی خواص مغناطیسی و مشخصه‌های جاذب مایکروویو پوشش‌های کامپوزیتی بر پایه پلی فنیل سولفید در محدوده ۴۰۰ مگاهرتز تا ۳۲ گیگاهرتز مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، محلول‌های پیش‌ساز با نسبت مولی مختلف  $St^{2+}/Fe^{3+}$  تهیه و در دماهای ۶۰۰ تا ۹۰۰ °C تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. جدول ۴ بیانگر خواص مغناطیسی نمونه‌های ساخته شده است.

جدول ۴- خواص مغناطیسی نمونه‌های مختلف تحت بررسی [۳۱]

کد نمونه	فاز تشکیل شده	ساختار بلوری	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)	Hc (Oe)
S1	$\alpha-Fe_2O_3$	مکعبی	۶	-	-
S2	$\alpha-Fe_2O_3$ , $SrFe_{12}O_{19}$	مکعبی، هگزگونال	۳۸	۲۵	۳۹۹/۴
S3	$SrFe_{12}O_{19}$	هگزگونال	۶۰	۳۶	۴۶۴/۲
S4	$Fe_3O_4$ , $SrFe_{12}O_{19}$	مکعبی، هگزگونال	۶۳	۷	۱۵/۴

با توجه به جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت مواد مغناطیسی دارای ساختار هگزگونال، مغناطیس اشباع و کوئرسیویته بالاتری نسبت به مواد مغناطیسی دارای ساختار اسپینل دارند همچنین نمونه مخلوط ساختار

### ۳- بررسی اثر عوامل ساختاری بر خواص جذب الکترومغناطیس

مواد معدنی معمولی مانند فریت‌ها و پودرهای فلزی، اتلاف مغناطیسی و الکتریکی بالایی از خود نشان می‌دهند، اما در سال‌های اخیر، برخی معایب آنها کاربردشان را با محدودیت مواجه کرده است. به عنوان مثال، این ساختارها چگالی نسبتاً زیادی دارند (چگالی فریت‌های منگنز و روی و ذرات آهن به ترتیب ۵ و ۷/۸ گرم بر سانتی مترمکعب می‌باشد)، به علاوه تولید آنها برای استفاده عملی دشوار بوده و اغلب رسانایی الکتریکی بالایی دارند که منجر به کاهش سریع نفوذپذیری مغناطیسی در بسامدهای بالا، به وسیله اتلاف جریان گردابی<sup>۱</sup>، می‌گردد و ضمن اینکه آنها باند جذب باریکی دارند. این مواد اغلب به عنوان جاذب امواج الکترومغناطیسی در بسامدهای پایین استفاده می‌شوند (مانند محفظه‌های بدون انعکاس<sup>۲</sup>).

پلیمرها، با چگالی پایین (مانند چگالی پلی آنیلین و پلی پیرول که به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و فوم پلی استیلن حدود ۰/۰۴ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد)، فرآیندپذیری و حتی خواص الکترومغناطیسی می‌توانند به مشکلات اشاره شده غلبه کرده و به طراحی جاذب‌های ایده آل کمک نمایند. اگر چه، جاذب‌های امواج الکترومغناطیس با پلیمر تنها، جهت ایجاد اتلاف مغناطیسی و الکتریکی بزرگ کافی نیستند که همچنین کاربرد آنها را در بسامدهای بالا محدود می‌کند. مواد نانو ساختار از مواد امیدبخشی هستند که بتوانند معایب ذکر شده را جبران کرده و به دلیل سطح ویژه بالاتر، اتم‌های سطحی بیشتر، انعکاس چندگانه و بنابراین اتلاف مغناطیسی و دی الکتریک بالاتر، قابلیت جذب امواج الکترومغناطیس را ارتقاء می‌دهند. ترکیب پلیمر و

<sup>1</sup> Eddy current loss

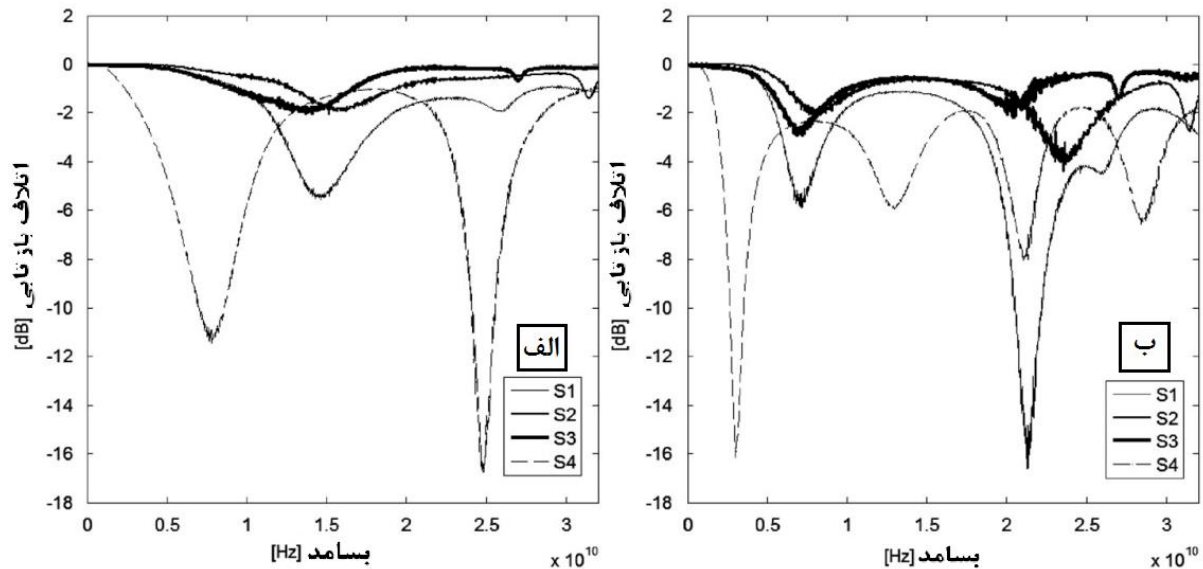
<sup>2</sup> Anechoic chambers

<sup>3</sup> Drmota



۵، فریت‌های دارای ساختار اسپینل برای جذب امواج الکترومغناطیس در محدوده بسامدی با گیگاهرتز کم، مناسب بودند. در حالی که هگزآگونال فریت‌ها در محدوده بسامدهای با گیگاهرتز بالا جذب مناسبی را ارائه می‌دهند. بنابراین پوشش‌های کامپوزیتی تشکیل شده از مخلوط پرکننده‌های مغناطیسی ذکر شده، می‌تواند یک جاذب مناسب الکترومغناطیس با محدوده جذب وسیع باشد.

اسپینل و هگزآگونال بالاترین مغناطیس اشباع را ارائه کردند اما اختلاط این دو ساختار باعث کاهش کوئرسیویته آن نسبت به فاز هگزآگونال خالص شد. سپس تغییرات اتلاف بازتابی نمونه‌های مختلف در پوشش‌های کامپوزیتی با ضخامت‌های ۲ و ۴ میلی‌متر بررسی شد که نمودارهای حاصل از این بررسی در شکل ۸ و نتایج حاصل از آن در جدول ۵ قابل مشاهده است. با توجه به نتایج حاصله از شکل ۸ و جدول



شکل ۸- تغییرات اتلاف بازتابی (جذب الکترومغناطیس) در مقابل بسامد برای نمونه‌های پوشش‌های کامپوزیتی با پرکننده‌های متفاوت با ضخامت‌های الف) ۲ میلی‌متر ب) ۴ میلی‌متر [۳۱].

جدول ۵- خواص جذب امواج الکترومغناطیس برای نمونه‌های پوشش‌های کامپوزیتی متفاوت [۳۱].

کد نمونه	ضخامت (میلی متر)	بسامد حداقل اتلاف بازتابی (گیگا هرتز)	مقدار حداقل اتلاف بازتابی (دسی بل)
S1	۲	۱۴/۳	-۵/۲
	۴	۷	-۵/۸
	۴	۲۱/۳	-۱۶/۵
S2	۲	۱۵/۷	-۱/۸
	۴	۷/۷	-۲
	۴	۲۳/۵	-۴
S3	۲	۱۴	-۲
	۴	۷	-۵/۷
	۴	۲۰/۵	-۲
S4	۲	۷/۷	-۱۱/۲
	۲	۲۴/۸	-۱۶/۷
	۴	۳	-۱۶
		۱۳	-۵/۸
		۲۱/۵	-۷/۹
۲۸/۵	-۶/۳		

مانند. پوشش‌های کامپوزیتی دارای تنها ۲۰٪ وزنی از PANI جذب الکترومغناطیس به اندازه ۱۱ دسی بل در طول موج ۱۸ گیگاهرتز نشان داد در حالی که پوشش‌های کامپوزیتی با ضخامت فقط یک میلی‌متر شامل ۱۵٪ PANI و ۱۰٪ مگنتیت جذبی معادل با ۴۲- دسی بل دارد که برابر با جذب و اتلاف ۹۹٪ از امواج الکترومغناطیس ورودی است. به‌علاوه با استفاده از مشخصه‌های الکترومغناطیس نشان داده شد که جذب الکترومغناطیسی در پوشش‌های کامپوزیتی هیبریدی PANI/magnetite/epoxy بهتر از پوشش‌های کامپوزیتی PANI/epoxy صورت گرفته است.

همچنین در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۴ که توسط جمالیان و همکاران صورت گرفت [۳۳]، اثر نانولوله‌های کربنی چند دیواره<sup>۴</sup> و همچنین تلقیح یون‌های Mn-Sn-Ti به ساختار هگزاگونال استرانسیم فریت تهیه شده به روش سل ژل، بر روی خواص مغناطیسی و جذب میکروویو پوشش‌های کامپوزیتی شامل هگزاگونال استرانسیم فریت مورد مطالعه قرار گرفت.

<sup>1</sup> Belaabed

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

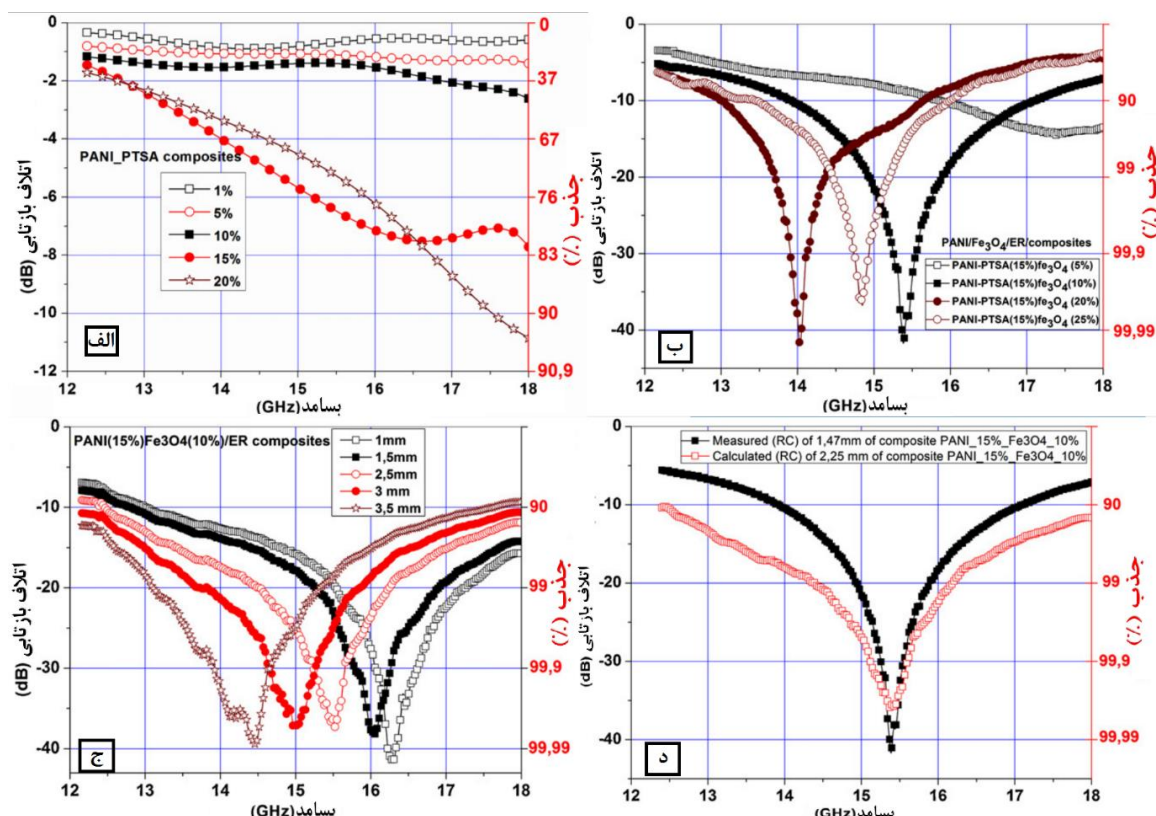
<sup>3</sup> Vector Network Analyser

<sup>4</sup> Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT)

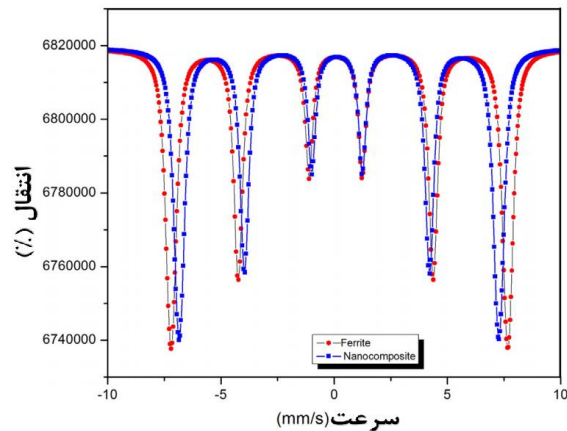
در پژوهشی دیگر بلابد<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۳۲]، به ساخت و مشخصه‌یابی جاذب‌های میکروویو هیبرید آلی- معدنی پرداختند. بر این اساس پوشش‌های کامپوزیتی بر پایه رزین اپوکسی با مقدارهای متفاوتی از پرکننده‌های مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) و پلی‌انیلین تلقیح شده با پاراتولون سولفونیک اسید (PANI-PTSA) تهیه شد و ضمن مطالعات ساختاری و ریزساختاری، خواص جذب الکترومغناطیسی آنها نیز در محدوده ۱۲ تا ۱۸ گیگاهرتز مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا با آزمون پراش پرتو ایکس خلوص بالای مگنتیت و تلقیح شدن PTSA<sup>۱</sup> روی PANI<sup>۲</sup> ثابت شد و پس از آن به‌وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> ریزساختار آنها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نیز با استفاده از دستگاه تحلیل‌کننده شبکه برداری<sup>۳</sup> خواص الکتریکی و مغناطیسی مورد نیاز برای جذب امواج الکترومغناطیس مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۹ آورده شده است. مشاهدات حاصل از شکل ۹ نشان می‌دهد، ضرایب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی با افزایش مقدار پرکننده‌ها در پوشش‌های کامپوزیتی به بیشترین مقدار خود نزدیک شدند و همچنین با افزایش بسامد این خواص تقریباً ثابت باقی

<sup>1</sup> Para-toluene sulfonic acid

<sup>2</sup> Polyaniline



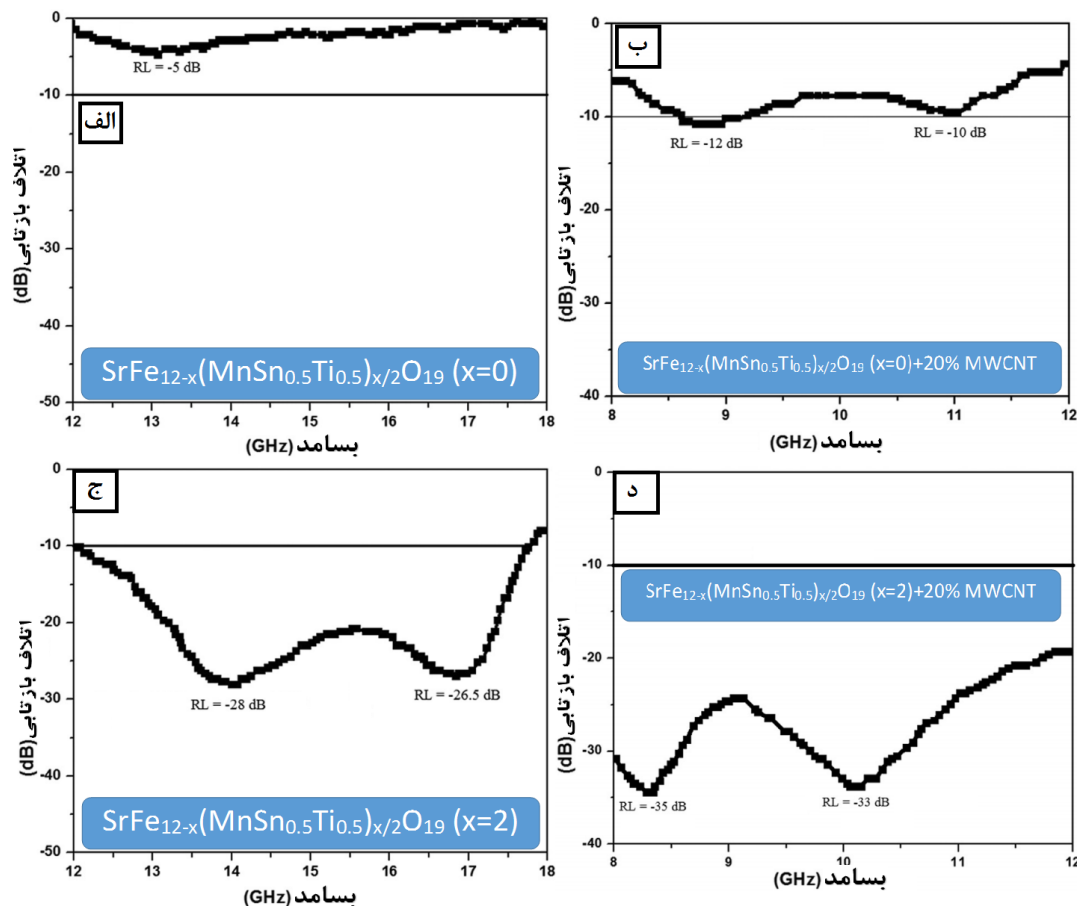
شکل ۹- اتلاف الکترومغناطیس در مقابل بسامد با مقادیر مختلف پرکننده: الف) پوشش‌های کامپوزیتی شامل PANI-PTSA/epoxy (ب) پوشش‌های کامپوزیتی هیبریدی PANI/magnetite/epoxy (ج) پوشش‌های کامپوزیتی هیبرید PANI-PTSA (15%)/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (10%)/epoxy resin hybrid با ضخامت‌های مختلف (د) مقایسه بین اتلاف الکترومغناطیس محاسبه شده و اندازه‌گیری شده [۳۲].



شکل ۱۰- نمودار آزمون موزبائر برای پوشش‌های کامپوزیتی و نمونه استرانسیم هگزاگونال فریت تلقیح شده با یون‌های منگنز، قلع و تیتانیم [۳۳].

- <sup>1</sup> Mössbauer spectroscopy
- <sup>2</sup> Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
- <sup>3</sup> Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

برای این منظور سه نوع پوشش‌های کامپوزیتی، یکی بر پایه هگزا فریت استرانسیم خالص، دیگری هگزا فریت استرانسیم تلقیح شده با مقادیر متفاوت یون‌های Mn-Sn-Ti و همچنین هگزا فریت استرانسیم تلقیح شده به همراه ۲۰٪ حجمی MWCNT از لحاظ ساختاری و خواص مغناطیسی و جذب مایکروویو مقایسه شدند. آزمون اسپکتروسکوپی موزبائر<sup>۱</sup> (شکل ۱۰) نشان داد کاتیون‌های غیرمغناطیسی  $Mn-Sn^{4+}-Ti^{4+}$  در ساختار شبکه هگزاگونال قرار گرفتند. همچنین آزمون‌های طیف‌سنجی زیر قرمز<sup>۲</sup> و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۳</sup> نشان دادند که نانوذرات  $SrFe_{12-x}(MnSn_{0.5}Ti_{0.5})_{x/2}O_{19}$  ( $x=0,1,2$ ) به خوبی به سطح خارجی MWCNT ها متصل شده‌اند. در شکل ۱۱ بررسی خواص اتلاف بازتابی (جذب الکترومغناطیس) پوشش‌های کامپوزیتی مختلف را نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ و آزمون‌های مغناطیسی شایان ذکر است، با افزایش مقدار یون‌های ناخالصی، مغناطیس اشباع و همچنین کوئرسیویته کاهش می‌یابند که این مقادیر با اضافه شدن ۲۰٪ وزنی MWCNT به پوشش‌های کامپوزیتی مورد نظر، مجدداً کاهش یافتند. از سوی دیگر خاصیت جذب امواج الکترومغناطیس، با تلقیح یون‌های یاد شده، بهبود یافته و بهبود این خاصیت با اضافه شدن ۲۰٪ وزنی MWCNT قابل توجه بوده است.



شکل (۱۱) منحنی اتلاف الکترومغناطیس پوشش‌های کامپوزیتی دارای: الف)  $SrFe_{12-x}(MnSn_{0.5}Ti_{0.5})_{x/2}O_{19}$  ( $x=0$ ) + 20% م. ب)  $SrFe_{12-x}(MnSn_{0.5}Ti_{0.5})_{x/2}O_{19}$  ( $x=0$ ) + 20% م. ج)  $SrFe_{12-x}(MnSn_{0.5}Ti_{0.5})_{x/2}O_{19}$  ( $x=1$ ) + 20% م. د)  $SrFe_{12-x}(MnSn_{0.5}Ti_{0.5})_{x/2}O_{19}$  ( $x=2$ ) + 20% م. [۳۳].

## ۴- نتیجه‌گیری

روش سنتز آنها و هم از نظر ساختار آنها بسیار موثر است تا بتوان پرکننده‌هایی با خواص الکتریکی و مغناطیسی بالا برای پوشش‌های کامپوزیتی جاذب با جذب بالا انتخاب نمود. سپس باید مطمئن شد که در تمام سطح و حجم پوشش‌های کامپوزیتی بین امواج الکترومغناطیس و پوشش‌های کامپوزیتی برهم‌کنش وجود دارد تا از تمام ظرفیت اتلاف الکترومغناطیس استفاده شود و در نهایت می‌توان گفت برای افزایش هرچه بیشتر مقدار اتلاف با توجه به غلظت پرکننده، یک ساختار گرادینانی از امپدانس در پوشش‌های کامپوزیتی مورد نیاز است تا انعکاس و عبور امواج کاهش پیدا کرده و جذب (اتلاف) افزایش یابد.

برای گسترش و بهبود پوشش‌های کامپوزیتی جاذب امواج الکترومغناطیس، لازم است پوشش کامپوزیتی دارای میرایی بالا باشد و این خاصیت به این گونه است که خود را در بازتاب کم سطح خارجی نشان می‌دهد و نتیجه آن کاهش مقدار امواج بازتاب شده، و بالا رفتن ضریب میرایی است. (به خصوص در جاذب‌های صفحه‌ای مانند پوشش‌ها). از الزامات دیگری که برای پوشش‌های کامپوزیتی جاذب وجود دارد می‌توان به وزن کم، پایداری ساختاری و خواصی بستر با اضافه‌کردن پرکننده‌های فعال در جذب و توانایی جداسازی تمام ذرات پرکننده از یکدیگر اشاره کرد. از سوی دیگر انتخاب پرکننده‌ها هم از نظر

## ۵- مراجع

1. N. Dishovsky, "Rubber based composites with active behaviour to microwaves (review)", *J. Univ. Chem. Tech. Metal.* 44, 115-122, **2009**.
2. K. Chen, Q. Xu, L. Li, P. Gong, H. Chen, Q. Xiao, F. Xu, "A novel microwave absorber BaAl<sub>2</sub>Fe<sub>10</sub>O<sub>19</sub>/poly (m-toluidine) composite: Preparation and electromagnetic properties", *Sci. China Chem.* 55, 1220-1227, **2012**.
3. V. G. Harris, A. Geiler, Y. Chen, S. D. Yoon, M. Wu, A. Yang, Z. Chen, P. He, P. V. Parimi, X. Zuo, C. E. Patton, M. Abe, O. Acher, C. Vittoria, "Recent advances in processing and applications of microwave ferrites", *J. Magn. Magn. Mater.* 321, 2035-2047, **2009**.
4. N. A. Spaldin, "Magnetic Materials", Cambridge University Press, **2010**.
5. S. Lu, K. Ma, X. Wang, X. Xiong, W. Xu, C. Jia, "Fabrication and characterization of polymer composites surface coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MWCNTs hybrid buckypaper as a novel microwave-absorbing structure", *J. Appl. Polym. Sci.* 132, 41974 (1-7), **2015**.
6. A. Goldman, "Modern Ferrite Technology", Springer, **2006**.
7. R. Y. Hong, B. Feng, G. Liu, S. Wang, H. Z. Li, J. M. Ding, Y. Zheng, D. G. Wei, "Preparation and characterization of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polystyrene composite particles via inverse emulsion polymerization", *J. Alloys Compd.* 476, 612-618, **2009**.
8. K. K. Mallick, P. Shepherd, R. J. Green, "Dielectric properties of M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation", *J. Euro. Ceram* 27, 2045-2052, **2007**.
9. Y. Qing, W. Zhou, F. Luo, D. Zhu, "Effect of magnetic fillers on the electromagnetic properties of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>-epoxy composites within the 2-18 GHz range", *J. Mater. Chem. C* 1, 536-541, **2013**.
10. J. Huo, L. Wang, H. Yu, "Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption", *J. Mater. Sci.* 44, 3917-3927, **2009**.
11. W.-p. Li, L.-q. Zhu, J. Gu, H.-c. Liu, "Microwave absorption properties of fabric coated absorbing material using modified carbonyl iron powder", *Compos. B: Eng.* 42, 626-630, **2011**.
12. Z. Wang, L. Wu, J. Zhou, W. Cai, B. Shen, Z. Jiang, "Magnetite nanocrystals on multiwalled carbon nanotubes as a synergistic microwave absorber", *J. Phys. Chem. C* 117, 5446-5452, **2013**.
13. U. Schubert, "Synthesis of Inorganic materials", Wiley & Sons, **2000**.
14. Y. Ebrahimi, A. A. Sabbagh Alvani, A. A. Sarabi, H. Sameie, R. Salimi, M. Sabbagh Alvani, S. Moosakhani, "A comprehensive study on the magnetic properties of nanocrystalline SrCo<sub>0.2</sub>Fe<sub>11.8</sub>O<sub>19</sub> ceramics synthesized via diverse routes", *J. Ceram. Int.* 38, 3885-3892, **2012**.
15. V. V. Soman, V. M. Nanoti, D. K. Kulkarni, "Dielectric and magnetic properties of Mg-Ti substituted barium hexaferrite", *Ceram. Int.* 39, 5713-5723, **2013**.
16. R. Shams Alam, M. Kavosh Tehrani, M. Moradi, E. Hosseinpour, A. Sharbati, "The role of matching thickness on the wideband electromagnetic wave suppresser using single layer doped barium ferrite.", *J. Magn. Magn. Mater.* 323, 1040-1043, **2011**.
17. G. Murtaza Rai, F. Aen, M. Islam, M. U. Rana, "Dielectric and magnetic behavior of BaCd<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>Fe<sub>16</sub>O<sub>27</sub> W-type hexagonal ferrites", *J. Alloys Compd.* 509, 4793-4796, **2011**.
18. Y. Liu, X. Liu, X. Wang, "Double-layer microwave absorber based on CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ferrite and carbonyl iron composites", *J. Alloy Compd.* 584, 249-253, **2014**.
19. K. El-Sayed, Z. K. Heiba, K. Sedeek, H. H. Hantour, "Magnetic, electric and crystallographic properties of diluted magnetic InSe<sub>(1-x)</sub>Fe(Co)<sub>x</sub> semiconductor", *J. Alloys Compd.* 530, 102-106, **2012**.
20. K. Byrappa, T. Adschiri, "Hydrothermal technology for nanotechnology", *Prog. Crystal Grow. Charac. Mater.* 53, 117-166, **2007**.
21. H. Y. He, "Comparison study on magnetic property of Co<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> powders by template-assisted sol-gel and hydrothermal methods", *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 23, 995-1000, **2011**.
22. S. Ozah, N. S. Bhattacharyya, "Nanosized barium hexaferrite in novolac phenolic resin as microwave absorber for X-band application", *J. Magn. Magn. Mater.* 342, 92-99, **2013**.
23. F. Wen, F. Zhang, Z. Liu, "Investigation on Microwave Absorption Properties for Multiwalled Carbon Nanotubes/Fe/Co/Ni Nanopowders as Lightweight Absorbers", *J. Phys. Chem. C* 115, 14025-14030, **2011**.
24. A. Namai, S. Sakurai, M. Nakajima, T. Suemoto, K. Matsumoto, M. Goto, S. Sasaki, S. Ohkoshi, "Synthesis of an Electromagnetic Wave Absorber for High-Speed Wireless Communication", *J. Am. Chem. Soc.* 131, 1170-1173, **2009**.
25. G. Shen, M. Xu, Z. Xu, "Double-layer microwave absorber based on ferrite and short carbon fiber composites", *Mater. Chem. Physics* 105, 268-272, **2007**.
26. M. N. Rahaman, "Ceramic Processing and Sintering". 2<sup>nd</sup> Ed., Marcel Dekker Inc, **2003**.
27. Q. Pham, C. Bohnke, M. Crosnier-Lopez, O. Bohnke, "Synthesis and Characterization of Nanostructured fast ionic conductor Li<sub>0.30</sub>La<sub>0.56</sub>TiO<sub>3</sub>", *Chem. Mater.* 18, 4385-4392, **2006**.

28. R. C. Pullar, "Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics", *Prog. Mater. Sci.* 57, 1191-1334, **2012**.
29. M. Jamalian, A. Ghasemi, "A study of the effect of annealing temperature on structural, Magnetic, and microwave properties of barium hexaferrite nanoparticles with and without substitutions", *J. Supercond. Novel Magn.* 1-7, **2015**.
30. A. M. Y. El-Lawindy, S. A. Mansour, M. Hafiz, H. H. Hassan, A. A. Ali, "Influence of the mole ratio, sintering condition and particle size on the magnetic properties of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> synthesized by ceramic method", *Int. J. Appl. Ceramic Technol.* 7, 868-873, **2010**.
31. A. Drmota, J. Koselj, M. Drofenik, A. Žnidaršič, "Electromagnetic wave absorption of polymeric nanocomposites based on ferrite with a spinel and hexagonal crystal structure", *J. Magn. Magn. Mater.* 324, 1225-1229, **2012**.
32. B. Belaabed, J. Wojkiewicz, S. Lamouri, N. El Kamchi, T. Lasri, "Synthesis and characterization of hybrid conducting composites based on polyaniline/magnetite fillers with improved microwave absorption properties", *J. Alloys Compd* 527, 137-144, **2012**.
33. M. Jamalian, A. Ghasemi, E. Paimozd, "A comparison of the magnetic and microwave absorption properties of Mn-Sn-Ti substituted strontium ferrite with and without multiwalled carbon nanotube", *J. Appl. Phys.* 14, 909-915, **2014**.