



نانو تکنولوژی

منسوجات پلی اکریلونیتریل روکش یافته با نانوذرات فلزی مغناطیسی به منظور جاذب مایکروویو یا ریز موج

مسعود هاشمی

چکیده

منسوجات پلی اکریلونیتریل (PAN) با ضخامت ۲ میلی‌متر، از طریق روش پوشش‌دهی یا لایه‌نشانی فلزی غیرالکتریکی، با نانوذرات مغناطیسی در حمام‌های روکش‌دهی با نیکل (Ni)، کبالت (Co) و آلیاژهای آنها روکش داده شدند. ساختار کریستالی، مورفولوژی و طبیعت مغناطیسی کامپوزیتها توسط تفرق پرتوی ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، و تکنیک‌های اندازه‌گیری مغناطیس‌شوندگی جریان مستقیم (dc) تحت بررسی قرار گرفتند. اندازه‌گیری‌های جذب امواج مایکروویو وابسته به فرکانس، در محدوده فرکانس ۱۸-۱۲/۴ گیگاهرتز (باند های P و X) انجام شدند. خواص دیامغناطیسی و فرومغناطیسی نیز بررسی شدند. در نهایت، فهمیده شد که جذب مایکروویو کامپوزیتها، شدیداً وابسته به زمان روکش‌دهی است. یک پیک جذب بین ۱۴/۳ و ۱۵/۸ گیگاهرتز با پهنای باند جذبی مؤثر ۳-۴/۱ گیگاهرتز (تحت ۲۰- دسیبل حد افت انعکاس) مشاهده شد. افت انعکاس (RL) می‌تواند بین ۳۰- و ۵۰- دسیبل بدست آید. اینگونه دریافت شد که با افزایش زمان روکش‌دهی، افت انعکاس و پهنای باند جذبی کاهش یافتند. در حالیکه باند جذبی در منسوج پلی اکریلونیتریل روکش‌دهی شده با نیکل به سمت فرکانسهای کمتر حرکت می‌کرد، در مورد منسوج روکش‌شده با کبالت به سمت فرکانسهای بیشتر می‌رفت. کامپوزیت‌های روکش‌شده با آلیاژ نیکل-کبالت دارای منحنی نوسانی فرکانس جذبی نسبت به زمان روکش‌دهی بودند. این نتایج ما را به توسعه بیشتر منسوجات جاذب روکش‌یافته با نانوذرات مغناطیسی ترغیب می‌کند.

مقدمه

الکترومغناطیس را منعکس کند، بلکه استهلاک یا تضعیف این امواج از طریق انعکاس‌ها یا بازتاب‌های بین‌ذره‌ای روی سطح، نانوفلذات را ماده‌ای منتخب و مناسب برای حفاظت و جذب می‌سازد. همچنین ساختار پلیمری، نقش یک مقاومت ظاهری یا امپدانس منطبق را بین محیطی که در آنجا الکترومغناطیس اتفاق می‌افتد و از آن عبور می‌کند، بازی می‌کند. علاوه بر این، هم نانوفلذ و هم پلیمر امتیازات مکانیکی را عرضه می‌کنند. نخست، نانوفلذ امکان ایجاد کامپوزیت همگن را روی کل سطح لیف عرضه می‌کند. پلیمر با طبیعت انعطاف‌پذیر خود و تولید ساده در انواع شکل‌ها، می‌تواند به عنوان ماده میزبان مورد استفاده قرار گیرد. این خواص مکانیکی پلیمرها همچنین آنها را جزئی از کامپوزیت جاذب یا محافظ با ساختارهای فیزیکی متفاوت می‌کند. همه پلیمرها دارای این امتیاز نیستند که به عنوان واسطه تطبیقی استفاده شوند، بلکه فقط پلیمرهای رسانا می‌توانند با این خاصیت در نظر گرفته شوند. آنها از ایجاد مشکلات تطبیقی بین نانوفلذات و واسطه لیف پلیمری جلوگیری می‌کنند. خواص شیمیایی و رسانایی الکتریکی

تکنولوژی محافظ و جاذب رادار، به دلیل پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های ارتباطی، صنعتی، دفاعی، امنیتی و نظامی توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. همه این پیشرفت‌ها محققان را به سوی مواد جاذب امواج مایکروویو با ضخامت، هزینه، بارده، وزن، سختی/انعطاف‌پذیری، دوام و سازگاری الکترومغناطیسی و فیزیکی مناسب سوق داده است. نیازها یا تقاضاها برای کاربردهای مختلف از قبیل؛ جاذب رادار، مواد محافظتی، ناوبری، تکنولوژی هواپیما، تجهیزات الکترونیکی رادیویی، سیستم‌های وایرلس یا بی‌سیم، متفاوت می‌باشند. کاربرد شدید موج‌های الکترومغناطیسی در این قبیل نواحی سبب مشکلات تداخل الکترومغناطیسی (EMI) و سازگاری یا قابلیت کار همزمان الکترومغناطیس (EMC) می‌شود. برای غلبه بر این مشکلات سپرها یا محافظ‌های فلزی، جاذب‌های آهنی، مواد فروالکتریکی، مواد کامپوزیتی و پلیمرهای رسانا مورد استفاده قرار گرفتند. نانوذرات فلزی روی ساختار پلیمری، تشکیل یک لایه نامحدود نمی‌کنند، که همه امواج

نساء امری



ما فوق صوت اتانول نگاه داشته شدند و در نهایت با آب فراوان دیونیزه شسته شدند و در آن در ۴۰ درجه سانتیگراد خشکانده شدند. مرحله حساس سازی؛ همه منسوجات تحت عمل با حساس کننده سطحی SnCl_2 و HCl (۳۷٪ v/v)، با همزدن آرام برای مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق، قرار گرفتند. در طول این فرایند، برخی پیوندهای شیمیایی روی سطح پلی اکریلونیتریل شکسته می شوند و برای پیوند شیمیایی جدید آماده می شوند. سپس منسوجات با آب دیونیزه آبکشی شدند. در مرحله فعال سازی؛ PdCl_2 ، به منظور فراهم کردن هسته‌زایی فلزی استفاده شد. این حمام از مقدار معینی PdCl_2 ، HCl و H_3BO_3 جهت دستیابی به شرایط مورد نیاز (pH=2) فعال سازی سطح تشکیل شده بود. پارچه‌های فعال شده در آخر با آب دیونیزه آبکشی شدند. مرحله پوشش یا لایه‌نشانی (لایه‌نشانی فلزی غیرالکتريکی) مهمترین قسمت فرایند روکش دهی می باشد. محلول‌های روکش دهی فلزی حاوی نمک‌های فلز کامل (۲۵٪)، به منظور روکش نمودن سطوح پلی اکریلونیتریلی فعال شده در زمان‌های مختلف آماده شدند. مرحله عملیاتی آخر، روکش دهی پلی اکریلونیتریل لایه‌نشانی شده بطور غیرالکتريکی با فلز، با پلیمر مایع با وزن مولکولی کم به منظور محافظت کامپوزیت از اکسایش و خوردگی می باشد.

گدهای نمونه‌های روکش دهی شده و زمان‌های لایه‌نشانی مربوطه در جدول فهرست شده‌اند. در ادامه مقاله، نمونه‌های روکش یافته برای کمترین زمان (OA2) برای حمام نیکل، OA24 برای حمام کبالت، و OA54 برای حمام نیکل-کبالت) و طولانی‌ترین زمان (OA5) برای حمام نیکل، OA27 برای حمام کبالت، و OA57 برای حمام نیکل-کبالت) برای بررسی مفصل انتخاب شدند. ساختارهای کریستالی کامپوزیت‌های حاصله با اندازه‌گیری‌های تفرق پرتوی ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Rigaku D/Max-IIIC با تابش $\text{Cu K}\alpha$ در محدوده 2θ از ۲۰-۸۰ درجه معین شدند مورفولوژی سطحی کامپوزیت‌ها، با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) Philips XL30 SPEG آنالیز شد. خواص مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی، توسط مغناطیس‌سنج VSM SQUID (Quantum Desighn PPMS 9T) بین -2T و 2T در دمای اتاق بررسی شد. در نهایت، منسوجات روکش یافته با ضخامت ۲ میلی‌متر، برای اندازه‌گیری عبور/انعکاس با سیستم موج‌بر مستطیلی، در ابعاد $17/5 \times 9/5$ میلی‌متر مربع بریده شدند.

قبل از اندازه‌گیری‌های میکروویو، استانداردهای کالیبراسیون خط-انعکاس یافته-واقعی (TRL) تنظیم شدند. ضرایب عبور (S21) و انعکاس (S11) مرکب با سیستم موج‌بر ATM technology و آنالیزور HP PNA E8364B Vector Network analyzer در محدوده فرکانس ۱۸-۲۲ گیگاهرتز اندازه‌گیری شدند. ضرایب بدست آمده، برای محاسبه ثابت دی‌الکتريک نسبی مؤثر و نفوذپذیری هر کامپوزیت با ضخامت ۲ میلی‌متر، در الگوریتم NRW مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت افت

قابل تطبیق پلی اکریلونیتریل (PAN) آن را داوطلب بسیار مناسبی نسبت به دیگر پلیمرهای رسانا می‌سازد.

راه‌های بسیاری مثل پوشش دهی یا لایه‌نشانی خلاء، پراش یا اسپاترینگ و روکش دهی غیرالکتريکی، برای روکش نمودن سطوح پلیمری با فلزات هدف وجود دارند. از میان همه این تکنیک‌ها، روکش دهی غیرالکتريکی کاملاً متفاوت است، به دلیل اینکه دانه‌های فلزات روی سطح پلیمر با ساختارهای کریستالی و الکترونیکی تصادفی رشد می‌کنند. جزایر یا خوشه‌های فلزی بطور تصادفی، ناهمسانگردی مغناطیسی همراستای سطح را تصرف می‌کنند. علاوه بر این، ساختارهای فلزی روی پلیمر، در دامنه وسیعی از اندازه‌ها، از نانو تا میکرومتر رشد می‌کنند، که دارای مزیت برهم کنش‌های مغناطیسی و الکترونیکی متفاوت می‌باشد. این قبیل برهم کنش‌ها مرتبط با مشخصات جذب و حفاظت الکترومغناطیس مواد در حدود باند فرکانس وسیع می‌باشد. روش روکش دهی غیرالکتريکی، بر پایه این امتیازات انتخاب شد.

در تحقیقات قبلی نیکل و کبالت و نسبت‌های مختلف این فلزات توسط روش احیا یا کاهش پلیمری لایه‌نشانی شده بودند و همچنین از ساختمان‌های مخصوص پلیمر-فلز به همراه محلول آبی NaBH_4 درون فاز پلیمری جهت ایجاد یک پایه و اساس برای استفاده استخراج پلیمری واسطه، به عنوان روش تغلیظ یون‌های فلزی، استفاده شده بود.

در این جا منسوجات پلی اکریلونیتریل با قطر لیف ۲۰ میکرومتر با ذرات نیکل و کبالت و نیکل-کبالت ($\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$) از طریق تکنیک پوشش دهی یا لایه‌نشانی غیرالکتريکی در مدت زمان‌های گوناگون روکش دهی شدند. ساختار کریستالی، مورفولوژی، خاصیت مغناطیسی و رفتار جذب امواج میکروویو (در باند فرکانسی ۱۸-۲۲/۸ گیگاهرتز) تحت بررسی قرار گرفتند و با ذکر جزئیات بحث شدند.

روش‌های آزمایشگاهی و تکنیک‌های شناسایی و بررسی

الیاف پلی اکریلونیتریل صنعتی (PAN)، بدون هیچگونه محافظ یا رنگ، بصورت یک سطح مسطح در ابعاد 15×1 متر مربع بافته شده بودند. منسوجات بافته شده، در اندازه 10×10 سانتی متر مربع، جهت روکش دهی با نانو ذرات در حمام‌های مختلف، بریده شدند. فرایند روکش دهی منسوجات شامل ۵ مرحله بود. دو تا از این مراحل عملیات‌های مقدماتی و بعد از روکش دهی را تأمین می‌کردند، درحالی‌که سه مرحله اصلی باقیمانده، شامل عملیات‌های روکش دهی بودند. هر مرحله نیاز به یک فرایند حمام مخصوص با زمان، pH و دمای معین می‌باشد. این شرایط برای هر عملیات به ترتیب در زیر خلاصه شده‌اند. مرحله عملیات مقدماتی؛ در ابتدا، همه نمونه‌ها با دترجنت غیر یونی (pH=7) شسته شدند و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در حمام



انعکاس (RL) توسط روابط زیر محاسبه شد:

$$RL = 20 \text{ Log} \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (1)$$

که امپدانس یا مقاومت ظاهری واسطه برابر است با:

$$Z_1 = Z_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} \tan \left[\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \right) d \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (2)$$

که در اینجا μ_r و ϵ_r به ترتیب نفوذپذیری و ثابت دی الکتریکی مَرکب نسبی هستند، c سرعت نور، f فرکانس ریزموج و d ضخامت جاذب می باشد. نتایج در بخش بعدی با پارامترهای آماده سازی مربوط بحث شده اند.

بحث و نتایج

الیاف پلی اکریلونیتریل در حَمام های نمک نیکل، کبالت و مخلوط نیکل-کبالت روکش دهی شدند. کامپوزیت های بدست آمده توسط SEM و XRD تجزیه و تحلیل شدند.

مورفولوژی و بررسی ساختار کریستالی

توصیف نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده است. عکس های میکروسکوپی SEM پلی اکریلونیتریل به تنهایی و نمونه های پلی اکریلونیتریل روکش شده با نیکل، کبالت و نیکل-کبالت در شکل ۱-a-g ارائه شده اند. همانطور که در شکل ۱-a دیده می شود، الیافی با قطر حدود ۲۰ میکرومتر، برای پلی اکریلونیتریل خالص مشاهده شدند. هر ردیف در شکل ۱، کوتاهترین و طولانی ترین زمان های روکش دهی را برای نمونه های، به ترتیب نیکل (شکل ۱-b و c)، کبالت (شکل ۱-d و e) و نیکل-کبالت (شکل ۱-f و g) به نمایش می گذارد. با افزایش زمان روکش دهی، مشاهده شد که به دلیل تشکیل نانوذرات، زبری یا خشنی روی سطح این نانوالیاف افزایش یافت. این امر، یک برآورد مهم برای موفقیت فرایند روکش دهی می باشد.

اندازه گیری های XRD، بین ۲۰ و ۸۰ درجه، برای الیاف روکش یافته با نیکل، کبالت، و نیکل-کبالت در کوتاهترین و بلندترین زمان های روکش دهی انجام شدند. ساختار آمورف پلی اکریلونیتریل، یک

جدول ۱- کد های نمونه ها و زمان های روکش دهی مربوط به آنها

Ni		Co		Ni-Co	
Coating time (min)	Sample code	Coating time (min)	Sample code	Coating time (min)	Sample code
0.5	OA2	2	OA24	1.5	OA54
1	OA3	2.5	OA25	2.5	OA55
1.5	OA4	3	OA26	3.5	OA56
2	OA5	3.5	OA27	4.5	OA57

پهن شدگی را در زوایای کوچک نشان داد. برای زمان های روکش دهی کمتر (نمونه OA2، OA24، OA54)، تبلور فلز مشهود نیست و همچنین ساختار SnO باقی مانده مشاهده شد، که از حَمام حَسَّاس سازی نشأت گرفته است. کامپوزیت های روکش شده در طولانی ترین زمان در حَمام های نیکل، کبالت و نیکل-کبالت، همانطور که انتظار می رفت، به دلیل نانوذرات تشکیل شده پیک های شدیدی از خود به نمایش گذاشتند. موقعیت های پیک و بیشتر پیک های شدید، با الگوهای XRD مرجع در توافق بودند. ساختارهای کریستالی بر حسب الگوهای مرجع XRD ذیل مشخص شدند:

SnO (JCPDS 99-100-8876)

NiO (JCPDS 99-101-0286)

Ni-1 (JCPDS 99-101-3040)

Ni-2 (99-101-0883)

Ni-3 (JCPDS 99-101-3030)

Co (JCPDS 99-101-2978)

CoO (JCPDS 99-101-0211)

NiS (JCDPS 99-101-0932)

NiO (JCPDS 99-101-0286)

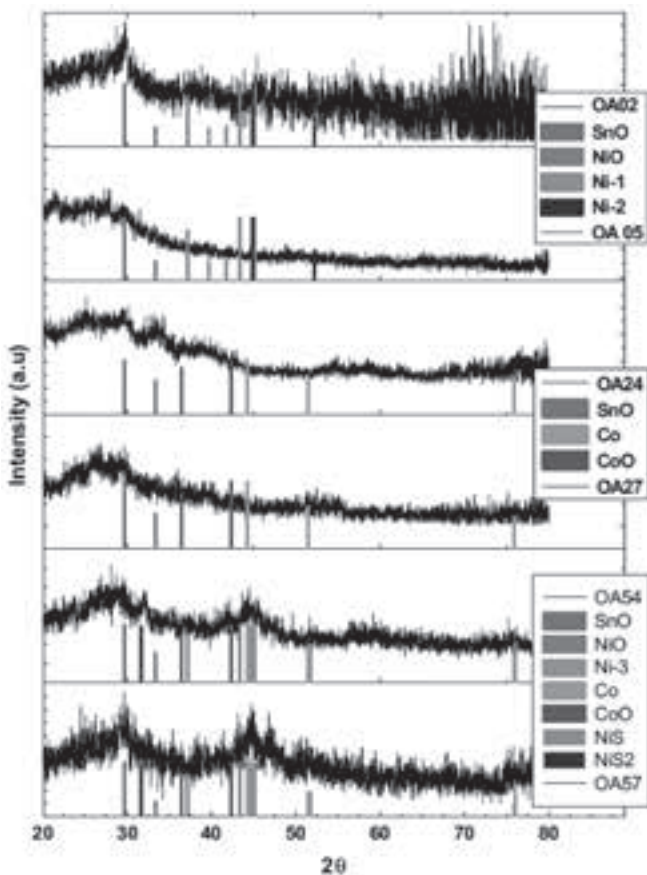
و NiS_2 (JCDPS 99-101-2464). به دلیل وجود خوشه های با اندازه کوچک، ساختارهای نیکل و کبالت، نتوانستند توسط XRD آشکارا تعیین شوند. با افزایش زمان روکش دهی، نویز یا اختلال در آنالیز، برای نمونه های روکش یافته با نیکل و کبالت کاهش یافت. واضح است که، با افزایش زمان روکش دهی و یا غلظت نمک فلز پوشش دهنده، این امکان وجود دارد که به روکش های متبلورتری دست یافت. اما خوشه های متبلور بیشتر، منجر به ایجاد روکش های فلزی با نظم بالا می شود که برای کامپوزیت های جاذب الکترومغناطیس مطلوب نمی باشد. حَمام نیکل-کبالت با دو منبع یون فلزی متفاوت، روکش های بهتری را عرضه کرد. علاوه بر این کامپوزیت های بدست آمده در زمان روکش دهی کوتاه تر، حاوی انواع یون فلزی بطور ناقص احیاء شده بودند، که می تواند وجود ترکیب های فلزی حاوی سولفور را در کنار وجود ذرات فلزی شرح دهد. سولفور می تواند به دلیل باقیمانده درجنت در مرحله عملیات مقدماتی یا اولیه باشد. پیک های مربوطه در شکل ۲ نشانه گذاری شده اند. به عنوان نتیجه، می توان استنباط کرد که روکش های ایجاد شده در زمانهای کوتاه، علاوه بر نانوساختارهای فلزی، شامل سولفیدها و اکسیدهای آنها نیز می باشند.

خواص مغناطیسی

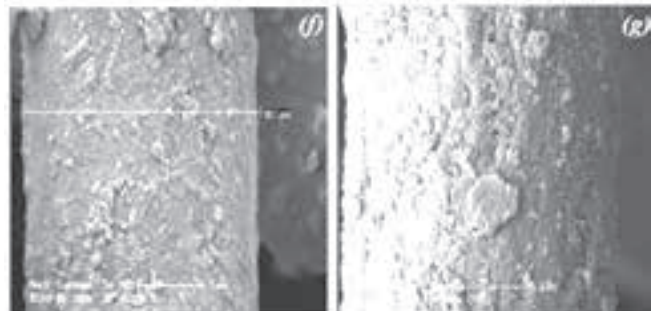
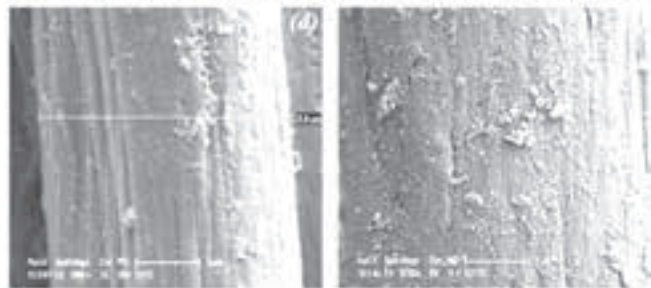
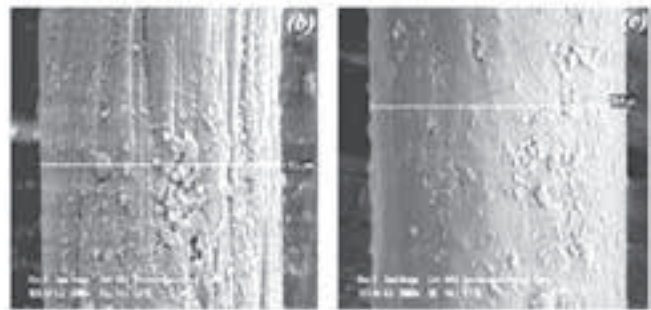
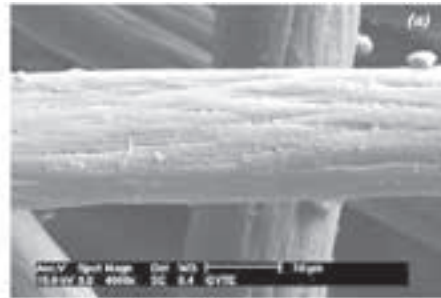
خواص مغناطیسی کامپوزیت های منتخب، توسط VSM در دمای اتاق معین شدند. کامپوزیت ها اساساً شامل الیاف پلی اکریلونیتریل بدون سهم مغناطیسی بودند و بنابراین مقادیر مغناطیس شونده نسبت به کل وزن



ساختار فرومغناطیس بیشتری داشتند و با لایه‌نشانی یا پوشش‌دهی بیشتر این رفتار شدید شد. بوگاش نتایج مشابهی را گزارش کرده بود که خوشه‌های نیکل با طبیعت دیامغناطیسی و خوشه‌های کبالت با طبیعت فرومغناطیس هستند. همچنین گزارش شده بود که میکرو میله‌های اکسید روی (ZnO) دارای هیستریزس دیامغناطیس هستند و بعد از آغشته‌سازی با نیکل، ۱/۲ درصد از کامپوزیت به خاصیت فرومغناطیس دست یافت. علاوه‌براین هم جیان‌فنگ و همکارانش و هم دونگلو و همکارانش، به ترتیب نیکل-کبالت-فسفر (Ni-Co-P) را روی خاکستر بادی و نانولوله‌های کربنی روکش شده با نیکل/کبالت را درون پلی‌استایرن مورد مطالعه قرار دادند و هر دو برهم‌کنش فرومغناطیسی مؤثر را در میدان‌های مغناطیسی کاربردی کوچکتر گزارش کردند، در حالیکه در میدان‌های بزرگتر سهم دیامغناطیس بر برهم‌کنش‌های فرومغناطیس غلبه کرد. نتایج ارزیابی مغناطیسی بدست‌آمده در اینجا، مشابه با گزارش‌های قبلی هستند. از عکس‌های میکروسکوپی SEM مشاهده شد، که با افزایش میزان مواد پوشش‌دهنده، تبلور بالاتر ذرات پوشش‌دهنده از پیک‌های XRD استنتاج شد و این امر نیز به نوبه خود باعث افزایش در خلصت فرومغناطیسی شد، بطوریکه در هیستریزس مغناطیسی مشاهده شد که این دو امر در پشتیبانی از یکدیگر هستند.

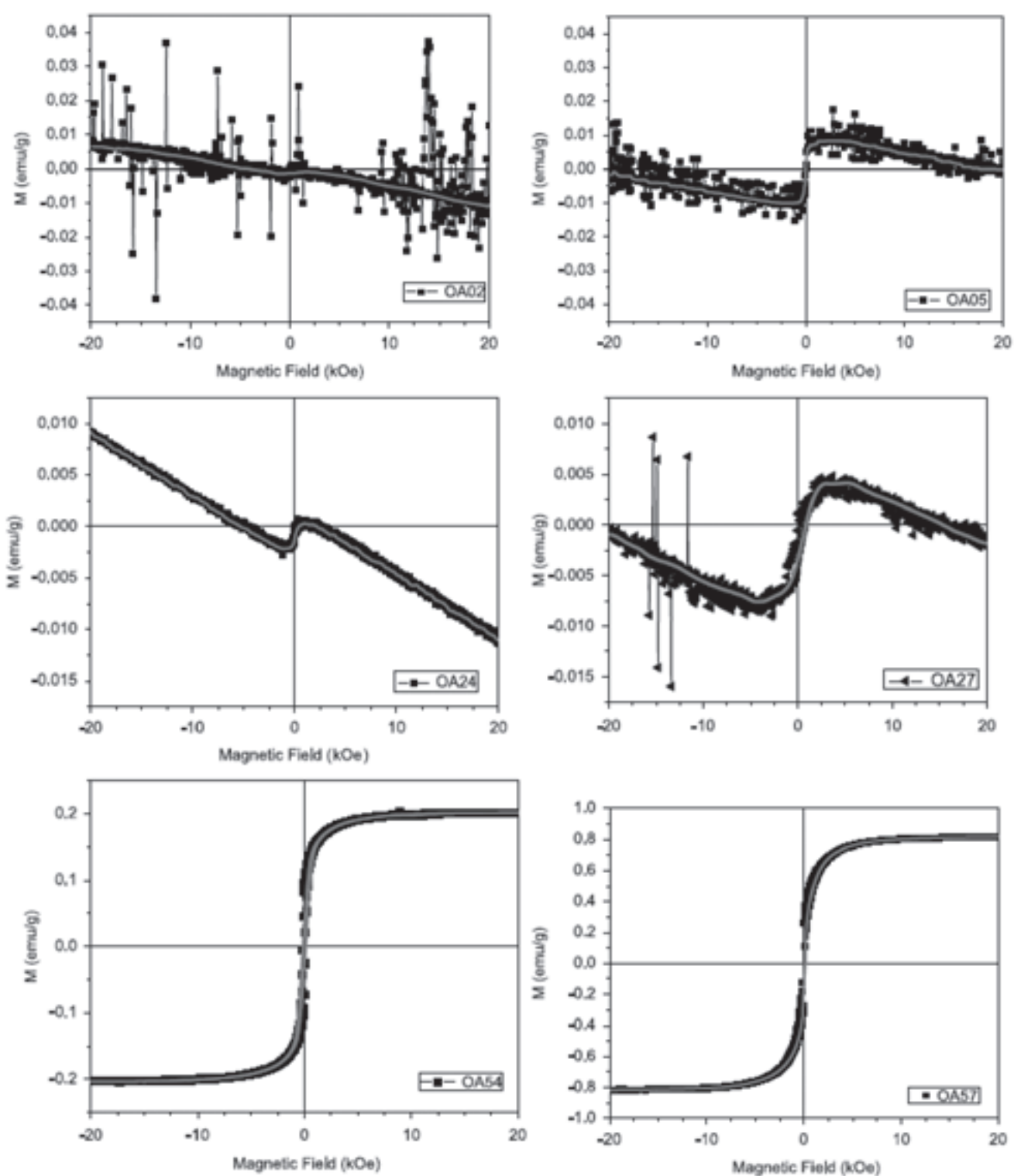


شکل ۲- الگوی XRD کامپوزیت‌های روکش شده در بیشترین و کمترین زمان روکش‌دهی با حمام (a) نیکل، (b) کبالت و (c) نیکل-کبالت.



شکل ۱- عکس‌های SEM: (a) پلی‌اکریلونیتریل؛ (b و c) پلی‌اکریلونیتریل روکش شده با نیکل (OA2، OA5)؛ (d و e) کبالت (OA24، OA27)، و (f و g) نیکل-کبالت (OA54، OA57) برای کوتاه‌ترین و بلندترین مدت‌زمان روکش‌دهی.

کامپوزیت‌ها علاوه بر جرم پلی‌اکریلونیتریل، نرمالایز یا بهنجار شدند. همه مقادیر مغناطیس‌شوندگی بایستی نسبت به نسبت وزنی جزء شریک مغناطیسی (شرکت‌کننده در مغناطیس‌شوندگی) در ترکیب در نظر گرفته شوند. هیستریزس مغناطیسی برای همه نمونه‌های منتخب در شکل ۳ نشان داده شده است. برهم‌کنش‌های دیامغناطیسی در پلی‌اکریلونیتریل روکش شده با نیکل، بسیار مؤثرتر و قدرمندتر از نوع فرومغناطیسی هستند. رفتار فرومغناطیسی این قبیل کامپوزیت‌های بدست‌آمده در حمام نیکل، با افزایش زمان‌های روکش‌دهی، قدرتمندتر شد. خوشه‌های نیکل با افزایش زمان غوطه‌وری در حمام، به ساختار متبلور منظم‌تر و مغناطیس‌تری دست یافتند. کامپوزیت‌های روکش‌یافته با کبالت



شکل ۳- منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی در دمای اتاق نسبت به میدان مغناطیسی کاربردی برای کامپوزیت‌های پلی‌اکریلونیتریل روکش شده با نانوذرات نیکل (OA02، OA05)، کبالت (OA24، OA27) و نیکل-کبالت (OA54، OA57) در زمان‌های مختلف (خطوط پر قرمز منحنی‌های هموار شده منحنی‌های M-H مربوطه هستند).

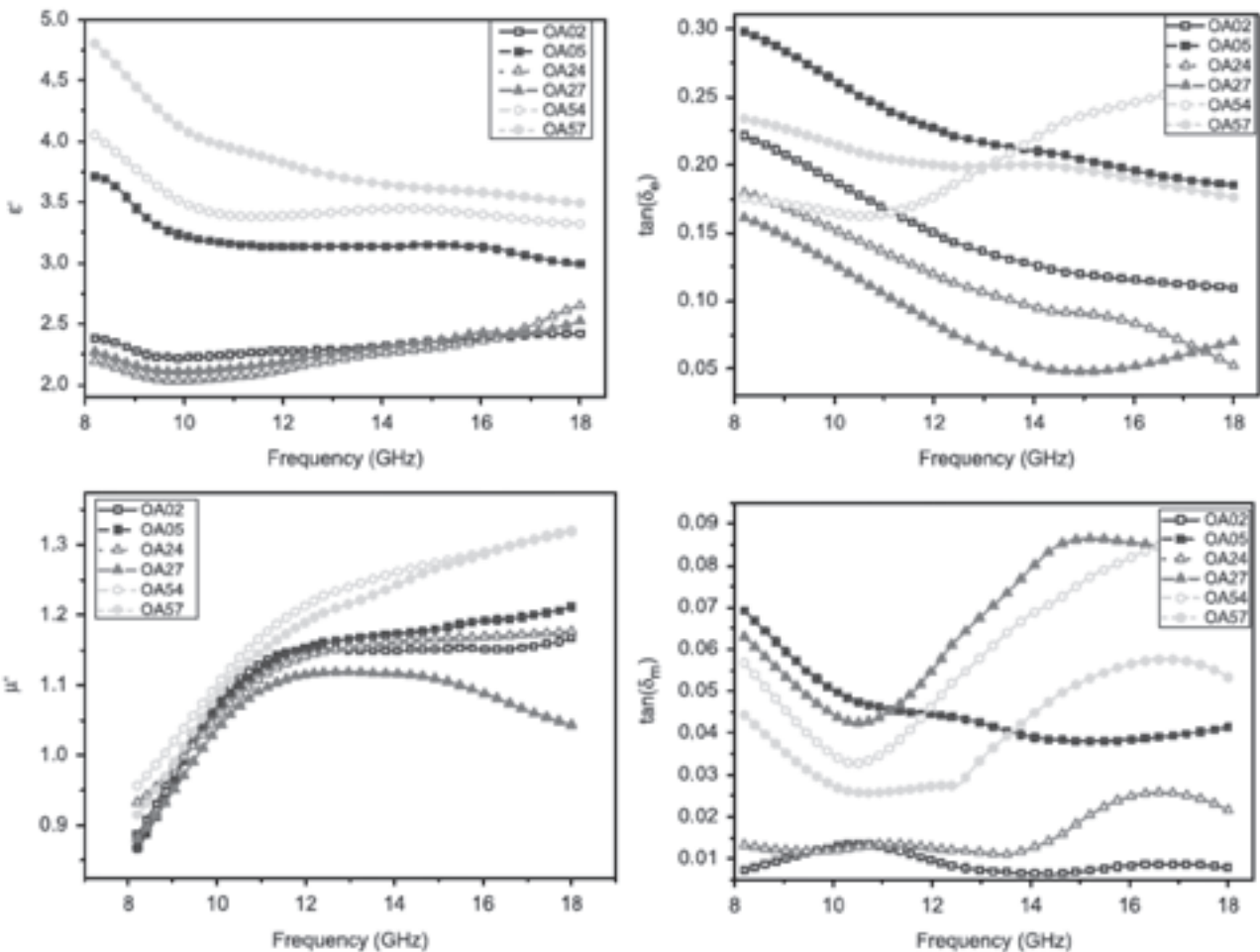
بدین ترتیب، کامپوزیت‌های بدست آمده در حمام مخلوط نیکل-کبالت دارای ساختار متبلورتر و مقدار بزرگتری از خوشه‌های پوشش‌دهنده نسبت به دیگر حمام‌ها هستند، و مغناطیسی شدن این کامپوزیت‌ها در میدان‌های بزرگتر، طبیعت فوق-پارامغناطیسی بدون برهمکنش‌های

دیامغناطیسی از خود نشان داد.
ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری در باند X و P
ثابت دی‌الکتریک (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) مرکب کامپوزیت‌ها از



کرده بودند. علاوه بر این، ژیاگو و همکارانش نشان داده بودند که کامپوزیت‌های (آهن، نیکل) روکش‌یافته با گرافیت، دارای مقادیر ϵ' در حدود ۸-۱۶ در باند ۲-۱۸ گیگاهرتز هستند. علاوه بر این، نانوکپسول‌های روکش‌شده با کربن، دارای مقادیر ثابت دی‌الکتریک مرکب ۸-۱۲ در محدوده فرکانس مشابه بودند. در همه مطالعات ذکر شده در بالا، اندکی کاهش در منحنی‌ها مشاهده شد و نمونه‌های روکش‌یافته با نیکل و روکش‌یافته با نیکل-کبالت در زمان طولانی، دارای گرایش‌های مشابه به همراه ثابت دی‌الکتریک کم با مزیت ایجاد مقاومت یا امپدانس با هوا بودند. مشخصه افت تانژانت دی‌الکتریک کامپوزیت‌ها، در حدود ۰/۵ و ۰/۳ بود، و علاوه بر این کامپوزیت‌های روکش‌شده در زمان طولانی با نیکل و آلیاژ نیکل-کبالت دارای مقادیر بیشتر این مشخصه بودند. نفوذپذیری مغناطیسی کامپوزیت‌ها با شیب تندی تا ۱۲ گیگاهرتز افزایش یافت، و بالاتر از این فرکانس، برای کامپوزیت‌های روکش‌دهی‌شده با کبالت، این افزایش اندکی به کاهش تغییر کرد. مقادیر μ' بین ۰/۹ و ۱/۳ نوسان داشتند. مقادیر μ' نزدیکی توسط مقالات دیگر گزارش شده بود، مثل مقدار μ' مربوط به نانوکپسول‌های روکش‌یافته با کربن، که

پارامترهای پراکندگی انعکاس امواج میکروویو و اندازه‌گیری‌های عبور با استفاده از روش Nicholson-Ross-Weir محاسبه شدند؛ نتایج در شکل ۴ ارائه شده‌اند. بخش حقیقی ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی مربوط به میزان پلاریزاسیون یا قطبی‌شدگی رخ داده در ماده، به ترتیب با میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی می‌باشد. بخش‌های فرضی آنها مرتبط با اتلاف انرژی می‌باشند. بخش حقیقی محاسبه‌شده ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی، افت تانژانت دی‌الکتریک ($\tan \delta_e = \epsilon''/\epsilon'$) و افت تانژانت مغناطیسی ($\tan \delta_\mu = \mu''/\mu'$) نمونه‌های منتخب در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. نمودارهای ϵ'' برای کامپوزیت‌ها، با فرکانس، اندکی تغییر می‌کنند. در حالیکه ϵ' نمونه‌های روکش‌شده با نیکل، با بیشتر شدن زمان روکش‌دهی افزایش مهمی داشتند (در محدوده ۳/۵-۵)، نمونه‌های روکش‌شده با کبالت به مقدار زیادی تحت تأثیر قرار نگرفتند (در محدوده ۲-۲/۵). کامپوزیت‌های آلیاژی (مخلوط نیکل و کبالت) همانطور که انتظار می‌رفت، تغییر متوسطی داشتند. لیو و همکارانش نانوکپسول‌های (آهن، نیکل)/کربن را با مقادیر ϵ' در حدود ۸-۱۶ در باند فرکانسی ۲-۱۸ گیگاهرتز، گزارش



شکل ۴- منحنی‌های ϵ' ، μ' ، $\tan \delta_e$ و $\tan \delta_\mu$ برای کامپوزیت‌های الیاف پلی‌اکریلونیتریل روکش‌شده با نانوذرات نیکل (OA02، OA05)، کبالت (OA24، OA27) و نیکل-کبالت (OA54، OA57) در مدت زمان‌های مختلف.

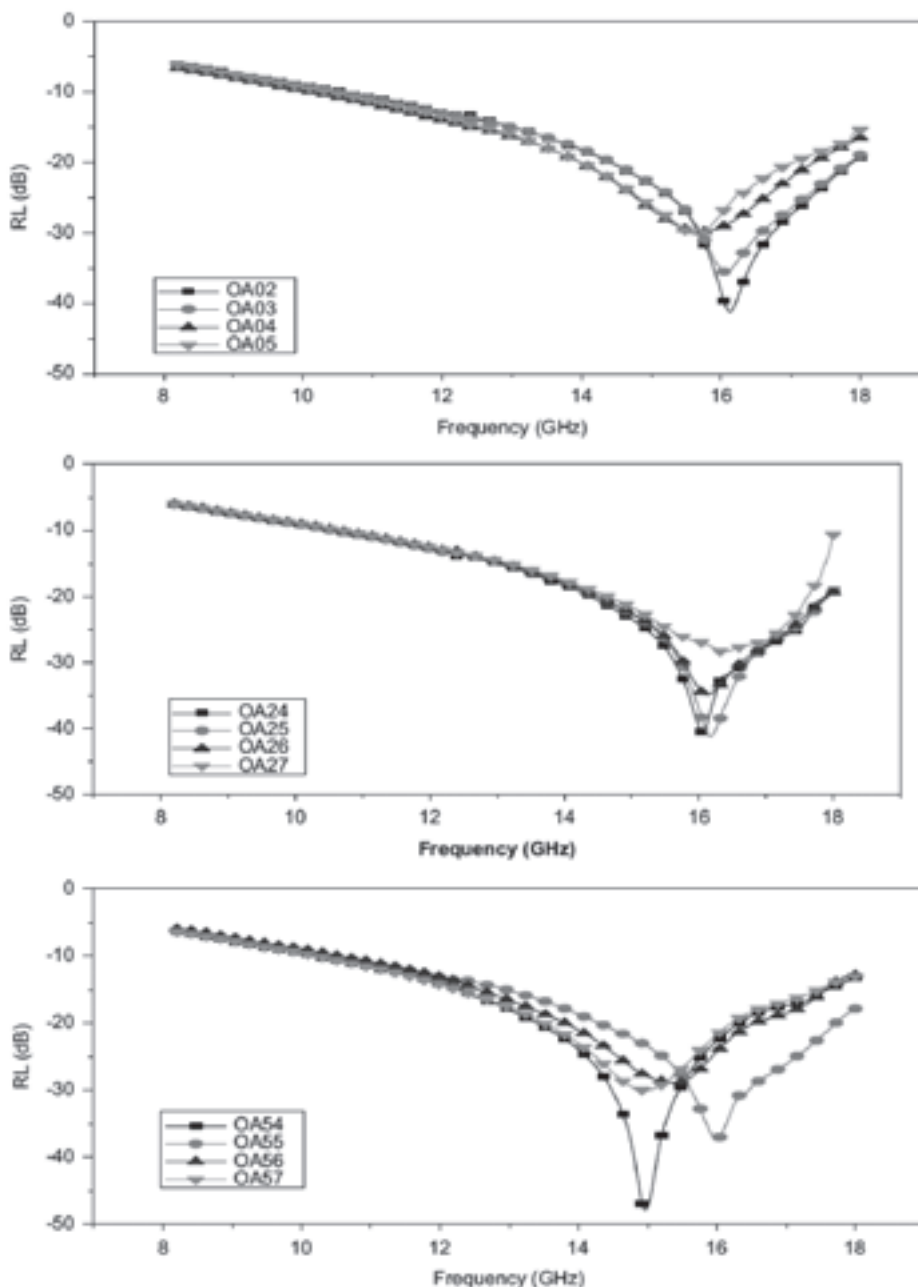


پارامترهای فیزیکی با نتایج گزارشات فوق‌الذکر در توافق هستند. سهم اصلی افت دی‌الکتریک در جذب، در مقالات و مراجع دیگر نیز، مشترک است.

خواص جذب امواج مایکروویو

برای بررسی خصلت جذب امواج مایکروویو، ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری اندازه‌گیری شده نمونه‌ها برای محاسبه افت انعکاس (RL) توسط رابطه (۱) استفاده شدند و نتایج در شکل ۵ برای کامپوزیت‌های روکش‌یافته با نیکل، نشان داده شده‌اند و با افزایش زمان

کاهش اندکی از ۰/۹ به ۰/۸ در محدوده فرکانس ۲-۱۸ گیگاهرتز داشت. در تحقیق دیگر، نانوکپسول‌های آهن، نیکل/کربن دارای مقدار ۱/۱ و ۰/۹ در محدوده فرکانس مشابه بودند؛ نانوکپسول‌های گرافیت-نیکل، آهن دارای ۱/۱ و ۱ در محدوده فرکانس مشابه بودند. افت تانژانت مغناطیسی دارای مقادیر کمتری نسبت به افت تانژانت دی‌الکتریک بود. مواد روکش‌یافته دارای افت تانژانت مغناطیسی متغیر بودند و نمونه‌های روکش‌شده با نیکل و نیکل-کبالت، یک پیک بین ۱۴ و ۱۸ گیگاهرتز داشتند. این امر انتظار می‌رفت که جذب بواسطه خصلت دی‌الکتریک کامپوزیت‌ها نسبت به جذب بواسطه افت مغناطیس، بیشتر غالب باشد.



شکل ۵- منحنی‌های افت انعکاس (RL) به عنوان تابعی از فرکانس و زمان روکش‌دهی برای پلی‌اکریلونیتریل روکش‌دهی شده با: (a) نیکل، (b) کبالت، (c) نیکل-کبالت. (برای جزئیات نمونه، جدول ۱ را ملاحظه کنید)

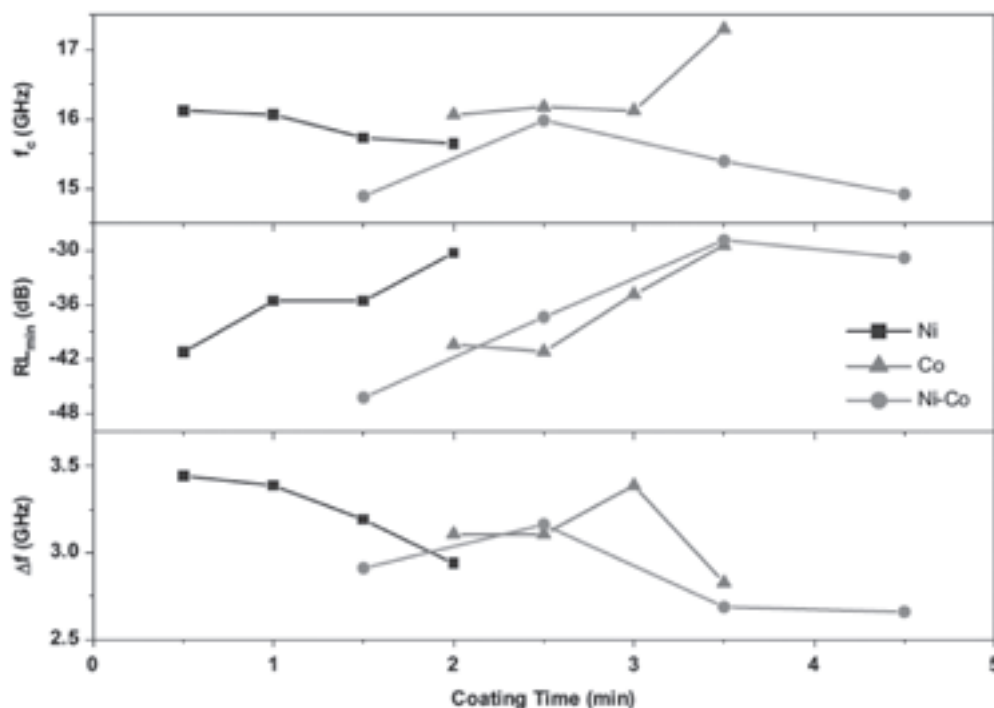


نتیجه‌گیری

در پایان، روکش‌های نیکل، کبالت و آلیاژ نیکل-کبالت روی پلی‌اکریلونیتریل بطور موفقیت‌آمیزی تهیه شدند و بطور مفصل تحت بررسی قرار گرفتند. الگوهای XRD، طبیعت دوگانه آمورف-متبلور را با حضور فلزات و کمپلکس‌های فلزی دیگر تأیید کردند. تشکیل نانوذرات روی پلی‌اکریلونیتریل توسط عکس‌های میکروسکوپی SEM تأیید و نشان داده شدند. رفتار مغناطیسی نمونه‌ها نشان داد که زمان روکش‌دهی طولانی‌تر منجر به ایجاد ساختار متبلورتر شد و ساختار نیکل-کبالت، بیشترین اشباع مغناطیس‌شوندگی را نشان داد، درحالی‌که نمونه روکش‌دهی شده با کبالت، مغناطیس‌شوندگی بیشتری را نسبت به نمونه‌های روکش‌دهی شده با نیکل نشان دادند. ترکیب پلی‌اکریلونیتریل و روکش‌های فلزی مغناطیسی، برای ایجاد مواد جاذب امواج میکروویو با عملکرد بالا، می‌تواند به کاهش ضخامت این قبیل مواد کمک کند. مشارکت نانوذرات مغناطیسی منجر به قطبی شدن سطح مشترک می‌شود. هرچه زمان روکش‌دهی کوتاه‌تر شود، افت انعکاس (RL) کمتر شده و پهنای باند بیشتری برای روکش‌ها بدست می‌آید. در کل، یک پیک پهن (پهنای در حدود ۳/۵ گیگاهرتز) در ۱۶ گیگاهرتز با کمتر از ۴۲- دسیبل، مخصوصاً کامپوزیت تهیه‌شده در حَمام نیکل در زمان ۰/۵ دقیقه، منجر به ایجاد پهنای باند جذبی وسیع‌تر و ضریب کمینه انعکاس در حدود ۴۲- دسیبل، و بیشتر از ۹۹/۹۹ درصد جذب میکروویو، شد. این نتایج توسعه بیشتر جاذب‌های منسوج روکش‌شده با نانوذرات مغناطیسی را برای کاربردهای گسترده امید می‌دهد.

روکش‌دهی از ۰/۵ به ۲ دقیقه، منحنی‌های جذب میکروویو، بهبود جذب و جابه‌جایی پیک‌ها به فرکانس کمتر را، نشان دادند. همچنین اینگونه ملاحظه شد که مقدار افت انعکاس (RL) نمونه OA05، با مقدار کمینه ۳۰/۲- دسیبل خود در فرکانس ۱۵/۶ گیگاهرتز، نسبتاً ضعیف می‌باشد. همچنین کامپوزیت‌های روکش‌دهی شده با کبالت، نتایج مشابهی از خود نشان دادند، بدین صورت که یک پیک جذبی داشتند و شدت آن با زمان روکش‌دهی تغییر می‌کرد. پیک جذبی در کامپوزیت‌های روکش‌شده با نیکل-کبالت به فرکانس‌های بالاتر تغییر کرد و سپس دوباره به فرکانس‌های کمتر برگشت.

شکل ۶، تغییرات در فرکانس مرکزی پیک جذبی، شدت‌های افت انعکاس کمینه، و پهنای باند را نشان می‌دهد، که در ناحیه تحت تراز ۲۰- دسیبل تعیین شدند. درحالی‌که مقادیر فرکانس، بین ۱۵ و ۱۷/۵ گیگاهرتز نوسان می‌کرد، مقادیر کمینه افت انعکاس بین ۳۰- و ۴۸- دسیبل تغییر می‌کرد و Δf دارای پهنای ۲/۵ و ۳/۵ گیگاهرتز بود. بدین ترتیب، در مقایسه با همه نمونه‌ها، باند فرکانس جذب میکروویو نمونه OA02، پهن‌تر می‌باشد و با افزایش زمان روکش‌دهی این باند کاهش می‌یابد. افت انعکاس کمینه، در نمونه‌های روکش‌دهی شده با نیکل و نیکل-کبالت در زمان‌های روکش‌دهی کمتر تعیین شد. در نتیجه، زمان روکش‌دهی بطور مستقیم بر موقعیت پیک جذبی، پهنای باند و شدت آن تأثیر می‌گذارد. هرچه زمان روکش‌دهی کامپوزیت کوتاه‌تر باشد، جاذب حاصله مؤثرتر و مفیدتر خواهد بود.



شکل ۶- تغییرات یا نوسانات در فرکانس مرکزی پیک جذبی، شدت‌های افت انعکاس کمینه و پهنای باند تحت تراز ۲۰- دسیبل برای نمونه‌های پلی‌اکریلونیتریل روکش‌شده با نیکل، کبالت و نیکل-کبالت.