

بهینه‌سازی فرآیند آبکاری الکترولس نیکل بر روی منسوجات بی‌بافت برای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی

احسان خواجه^۱، کمیل نصوری^{۲*}، غلامرضا عسکری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، اصفهان

^۲ دانشیار، گروه شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، اصفهان

^۳ استادیار، پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، اصفهان

k.nasouri@iut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

چکیده

امواج الکترومغناطیسی می‌توانند تهدیدی برای سلامت انسان و تجهیزات الکترونیکی باشند. در این پژوهش، پوشش‌دهی منسوجات بی‌بافت نایلون ۶ با نیکل توسط آبکاری الکترولس، به دلیل یکنواختی پوشش، به عنوان یک روش مؤثر برای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی بررسی می‌شود. عوامل مختلفی از جمله pH، غلظت نیکل سولفات، نسبت L:R، زمان آبکاری و ضخامت بستر بر کیفیت نهایی پوشش و میزان حفاظت در برابر امواج الکترومغناطیسی تأثیر می‌گذارند. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی شرایط فرآیند آبکاری الکترولس نیکل بر روی بی‌بافت نایلون ۶ به منظور افزایش محافظت داخلی الکترومغناطیسی (EMI) است. یافته‌ها نشان می‌دهند که با افزایش زمان لایه‌نشانی از ۰/۵ تا ۱۵ دقیقه، میزان EMI بیش از ۶ برابر افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت نیکل سولفات از ۶۰ تا ۷۰ g/L، محافظت بیش از ۵ برابر کاهش می‌یابد. در تمام نمونه‌ها سازگار محافظت بر اساس جذب امواج است. همچنین شرایط بهینه به صورت pH حدود ۸، غلظت نیکل سولفات ۶۰ g/L، نسبت L:R برابر با ۸۰:۱ و زمان نسبتاً بالای آبکاری ۱۵ دقیقه و ضخامت بستر ۳/۵ میلی‌متر می‌باشد. زمان آبکاری و غلظت نیکل سولفات تأثیر زیادی بر محافظت EMI دارند، که با بهینه‌سازی شرایط، میزان محافظت EMI می‌تواند تا ۴۹/۱۴ دسی‌بل افزایش یابد.

واژگان کلیدی: تداخل امواج الکترومغناطیسی، آبکاری الکترولس نیکل، منسوجات بی‌بافت، نایلون ۶

Optimization of the electroless nickel plating process on nonwoven textiles for electromagnetic waves shielding

Ehsan Khajeh¹, Komeil Nasouri^{2*}, Gholamreza Askari³

¹ PhD student, Textile chemistry and fiber science group, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Iran, Isfahan

² Associate Professor, Textile chemistry and fiber science group, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Iran, Isfahan

³ Assistant professor, Research Institute for Information and Communication Technology, Isfahan University of Technology, Isfahan

k.nasouri@iut.ac.ir

Abstract

Electromagnetic waves provide considerable risks to both human health and electronic equipment. This research explores the electroless nickel plating on nylon 6 nonwoven textiles as an effective method for shielding against electromagnetic waves due to the uniformity of the coating. Various parameters, including pH, nickel sulfate concentration, L: R ratio, plating duration, and substrate thickness, affect the final quality of the coating and EMI shielding effectiveness. The principal objective is to optimize the the conditions of electroless nickel plating process on nylon 6 nonwovens to increase electromagnetic interference (EMI) shielding. Results demonstrate that the enhancement in electroless plating duration from 0.5 to 15 min, led to a shielding effectiveness increase of more than six times, while an enhancement in nickel sulfate concentration from 60 to 70 g/L, resulted in a reduction in EMI shielding levels by over five times. In all samples, the shielding mechanism is based on wave absorption. The optimal conditions identified for attaining the highest EMI shielding involve a pH of approximately 8, nickel sulfate concentration of 60 g/L, an L:R ratio of 80:1, a relatively long plating duration of 15 min, and substrate thicknesses of 3.5 mm. Generally, this study illustrates that electroless plating duration and nickel sulfate concentration have a great influence on EMI shielding performance. In the relatively optimal conditions, a maximum shielding effectiveness is achieved up to 49.14 dB.

Keywords: Electromagnetic interference, electroless nickel plating, nonwovens, nylon 6

۱- مقدمه

با گسترش ارتباطات از راه دور و توسعه دستگاه‌های الکترونیکی هوشمند، امواج الکترومغناطیسی از انواع دستگاه‌ها و تجهیزات، از جمله آنتن‌ها و ابزارهای الکترونیکی ساطع می‌شوند [۱]. پدیده تداخل امواج الکترومغناطیسی (EMI) ^۱ شامل تابش‌های ناخواسته مختلفی است که ممکن است باعث آسیب ناخواسته تجهیزات الکتریکی شود. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض تداخل امواج الکترومغناطیسی ناشی از فناوری‌های ارتباطی، به کارکرد صحیح ابزارهای الکترونیکی و سلامت انسان و سایر موجودات زنده آسیب می‌رساند. مطالعات نشان داده‌اند که قرار گرفتن در معرض تشعشعات به صورت حاد یا مزمن ممکن است باعث سردردهای شدید و ایجاد چندین عارضه عصبی از جمله سردرد، تغییر در فعالیت‌های پاسخ الکتریکی عصبی، اختلال در الگوهای خواب و اختلال در آزادسازی انتقال‌دهنده‌های عصبی شود [۲]. برای کاهش اثرات مضر این امواج، پژوهش‌های زیادی در زمینه گسترش مواد محافظ الکترومغناطیسی انجام شده است. در این راستا از مواد رسانا و فلزات مختلفی مانند نقره، نیکل و مواد کربنی در کاربردهای محافظ EMI استفاده شده است. ذرات مغناطیسی دارای ویژگی‌های ذاتی منحصربه‌فرد و ویژه‌ای هستند که باعث می‌شوند کاربردهای آن‌ها در بخش‌های مختلفی مانند محیط زیست، میکرو الکترونیک، زیست‌فناوری و دیگر حوزه‌ها به طور روز افزون افزایش یابند. یکی از مزایای این

مواد، خواص مغناطیسی خیلی خوب آنهاست که باعث بهبود کارایی آن‌ها می‌شود [۳]. منسوجات به دلیل ویژگی‌هایی مانند انعطاف‌پذیری، سبکی، قابلیت تنفس و راحتی پوشش، نسبت به فلزات گزینه مطلوب‌تری برای جلوگیری از آسیب‌های EMI هستند و به‌طور خاص برای استفاده در پوشاک و سایر کاربردها مورد توجه هستند. چون مواد نساجی مورد استفاده عموماً عایق هستند و جریان الکتریکی را هدایت نمی‌کنند، باید قبل از استفاده از پارچه برای محافظت در برابر تداخل الکترومغناطیسی ^۲ (EMI SE)، آن را رسانای جریان الکتریکی کرد [۴]. پوشش‌های فلزی روی منسوجات می‌توانند هم‌زمان الزامات محافظت از امواج الکترومغناطیسی و سهولت در پوشیدن را برآورده کنند. روش‌های اصلی و رایج پوشش دهی روی منسوجات شامل آبکاری الکتریکی ^۳ [۵]، رسوب در خلاء ^۴ [۶]، کند و پاش مگنترون ^۵ [۷] و آبکاری بدون برق یا الکترولس ^۶ [۸] می‌باشد. آبکاری الکترولس به دلیل هزینه کم، سادگی فرآیند، تشکیل لایه‌های بادوام و لایه-نشانی یکنواخت و قابل کنترل روی سطوح پارچه‌ای غیر رسانا، روشی محبوب در پژوهش‌های علمی اخیر است و می‌تواند الزامات حفاظتی را برآورده کند. به طور کلی، اجزای اصلی فرآیند آبکاری الکترولس شامل یک بستر پارچه‌ای و یک لایه عاملی فلزی است. نیکل به دلیل خواص مغناطیسی مطلوب، مقاومت در برابر اکسید شدن و هزینه کم، معمولاً در این آبکاری استفاده می‌شود. در

² Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness

³ Electroplating

⁴ Vacuum deposition

⁵ Magnetron sputtering

⁶ Electroless plating

¹ electromagnetic interference (EMI)

سال‌های اخیر، فرآیند آبکاری الکترولس نیکل بر روی بسترهای گوناگونی با جنس‌های مختلفی انجام شده است. اما نایلون ۶ با ساختار ویژه خود به دلیل وجود گروه‌های قطبی مانند آمین و کربونیل، امکان جذب و برقراری پیوند بهتری با ذرات نیکل دارد. از طرف دیگر، نوع پارچه و روش‌های بافت آن (تاری‌پودی، حلقوی و بی-بافت) می‌تواند بر خواص محافظتی EMI پارچه‌های رسانای حاصل تأثیر بگذارد [۹، ۱۰]. هم‌چنین به طور کلی مزایای پلی‌آمیدها (نایلون‌ها) شامل سختی بالا، مقاومت سایشی بالا، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت بالا در برابر ترک‌خوردگی در چرخه‌های خمش متوالی، مقاومت شیمیایی عالی، مقاومت در برابر حلال‌های آلی و خواص نوری خوب اشاره کرد. ولی از طرف دیگر، نایلون‌ها دارای معایبی از جمله جذب رطوبت کم، مقاومت کم در برابر اسیدهای قوی و نفوذپذیری کم بخار آب به داخل فیلم‌های آنها هستند که با پوشش PVDC نفوذپذیری آن‌ها بهبود می‌یابد [۱۱]. منسوجات بی‌بافت به دلیل تصادفی قرار گرفتن الیاف و ضخامت نسبتاً بالایی که دارند، قابلیت بالایی برای محافظت و جذب امواج الکترومغناطیسی دارند. این منسوجات معمولاً ضخیم‌تر از پارچه‌های تاری‌پودی و حلقوی هستند، بنابراین امواج می‌توانند به داخل آن‌ها نفوذ کنند، جذب گردند و سپس به گرما تبدیل شوند. در نتیجه امواج الکترومغناطیسی عبوری از نمونه کاهش می‌یابد [۱۲]. به طور کلی، نتایج حاکی از این است که پارچه‌های بی‌بافت در مقایسه با منسوجات تاری‌پودی و حلقوی، دارای خواص حفاظتی

EMI برتری هستند [۱۰]. در فرآیند آبکاری الکترولس نیکل، عوامل متعددی بر کیفیت نهایی ذرات نیکل لایه-نشانی شده و میزان محافظت EMI پارچه تأثیر دارند. در پژوهش قبلی ما [۱۰]، تأثیر عامل زمان در سطوح مختلف به عنوان یکی از کلیدی‌ترین و بارزترین عوامل مؤثر در فرآیند آبکاری الکترولس مورد بررسی قرار گرفت. اما عوامل متعددی بر میزان لایه‌نشانی نیکل (به همراه ذرات فسفر که متأثر از حضور و استفاده از احیا کننده سدیم هیپوفسفات هستند) و نتیجه نهایی آبکاری الکترولس نیکل مؤثر هستند. با توجه به پژوهش‌های موجود، به نظر می‌رسد که تا به حال تأثیر عواملی چون pH، غلظت نیکل سولفات، نسبت حجم محلول به جرم نمونه (L:R) و ضخامت بستر بی‌بافت بر فرآیند آبکاری الکترولس نیکل روی پارچه بی‌بافت نایلون ۶ برای دستیابی به میزان محافظت EMI مناسب انجام نشده است. این پژوهش به‌طور خاص روی مطالعه تأثیر این عوامل به همراه بررسی عامل زمان لایه‌نشانی تمرکز دارد تا شرایط نسبتاً بهینه‌ای برای انجام فرآیند آبکاری الکترولس نیکل روی بی‌بافت نایلون ۶ به دست آید و تأثیر نسبی و هم‌زمان پارامترها (نه فقط تغییر یک پارامتر در یک زمان) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در حوزه میزان افزایش وزن، محافظت EMI و در برخی موارد میزان یکنواختی پوشش ایجاد شده و ریزساختار ذرات نیکل-فسفر لایه‌نشانی شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

افزایش وزن نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ قابل محاسبه است [۱۳].

$$W = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

به‌نحوی که m_0 و m_1 به ترتیب، وزن نمونه‌ها قبل و بعد از لایه نشانی نیکل - فسفر است.

هم‌چنین برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها به‌خصوص در بخش بررسی تأثیر ضخامت نمونه‌ها بر میزان محافظت EMI از دستگاه ضخامت سنج با دقت 0.1 میلی‌متر (HANS BAER AG, CH-8004 ZUERICH) استفاده شد. بررسی ساختار سطحی نمونه‌های تهیه شده، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (QUANTA FEG-450, FESEM) (ساخت آمریکا) انجام شد. محافظت مؤثر EMI پارچه‌های بی بافت لایه نشانی شده در بازه بسامد $12/0 - 8/0$ گیگاهرتز با استفاده از یک تحلیلگر شبکه برداری^۲ (VNA) HP 8510c (ساخت آمریکا) اندازه‌گیری شد. در واقع دستگاه VNA امواج ورودی، بازتاب شده و عبوری را برای تعیین میزان محافظت EMI مورد بررسی قرار می‌دهد که می‌توان آن را به بخش‌های بازتاب، جذب و عبوری تقسیم کرد. بنابراین دستگاه VNA می‌تواند تجزیه و تحلیل جامعی از عملکرد حفاظتی ماده را نشان دهد. این روش معمولاً برای ارزیابی میزان اثربخشی حفاظتی مواد در فرکانس‌های مختلف مفید است. امواج ورودی و عبوری از نمونه به صورت ریاضی و با استفاده از پارامترهای پراکندگی^۳، که به عنوان

پارچه بی بافت نایلون ۶ خالص سوزن زنی شده با وزن حدود 100 و 175 گرم بر متر مربع با میانگین ضخامت های حدود 2 و $3/5$ میلی متر بدون لاتکس از شرکت ظریف مصور تهیه شد. نیکل سولفات هگزا هیدرات ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، $262/8$ گرم بر مول) و سدیم هیپوفسفات مونو هیدرات ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ، 106 گرم بر مول) از شرکت سیگما - آلد ریچ تهیه شدند. هیدروکلریک اسید 37% وزنی (HCl 37 wt.%، $36/34$ گرم بر مول)، قلع کلرید دی هیدرات ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، $225/6$ گرم بر مول)، پالادیوم کلرید (PdCl_2 ، $177/3$ گرم بر مول)، آمونیوم کلرید (NH_4Cl ، $53/5$ گرم بر مول)، تری سدیم سیترات دی هیدرات ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، $294/1$ گرم بر مول) و آمونیوم هیدروکسید 25% (NH_4OH ، 35 گرم بر مول) از شرکت مرک مورد استفاده قرار گرفتند. صابون پاک‌کننده غیریونی (Zed oil s 100) از شرکت شیمیایی ساویس مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- مشخصه یابی

فرآیند آبکاری الکترولس نیکل با استفاده یک بشر که بر روی دستگاه هیتر استیرر قرار گرفته بود، انجام شد. یکی از ساده‌ترین روش‌های سنجش بازده آبکاری الکترولس نیکل، اندازه‌گیری درصد افزایش وزن است. برای محاسبه و اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها، قبل و بعد از لایه نشانی نیکل - فسفر، از ترازو با دقت 0.0001 گرم (Nano Pajouhan - Raga، ساخت ایران) استفاده شد. در نتیجه درصد

¹ Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

² Vector Network Analyzer (VNA)

³ Scattering parameters

کرد. مقادیر SE_{tot} ، SE_R و SE_A با استفاده از روابط (۲-۴) اندازه‌گیری و محاسبه شد [۱۸].

$$SE_{tot} = -10 \log(|S_{21}|^2) \quad (2)$$

$$SE_R = -10 \log(1 - |S_{11}|^2) \quad (3)$$

$$SE_A = SE_{tot} - SE_R \quad (4)$$

۲-۳- فرایند آبکاری الکترولس نیکل

آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها با استفاده از سطح فعال‌گیر یونی با غلظت ۲ g/L و سپس شستشو به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. بعد از آن نمونه‌ها از محلول شستشو خارج شده و با آب مقطر آبکشی شدند و اجازه داده شد تا نمونه‌ها خشک شوند. تهیه پارچه رسانا از طریق آبکاری نیکل الکترولس طی ۳ مرحله اصلی حساس‌سازی، فعال‌سازی و آبکاری الکترولس نیکل انجام می‌شود. جهت انجام مراحل حساس‌سازی و فعال‌سازی، ابتدا پارچه بی‌بافت تمیز شده به مدت ۱۵ دقیقه در محلول اسیدی $SnCl_2$ (۴۰ g/L و pH~1) و سپس در محلول اسیدی $PdCl_2$ (۰/۷۵ g/L و pH~1) در دمای اتاق قرار گرفت. در هر دو مرحله جهت غوطه‌وری کامل نمونه در محلول آماده شده، نسبت L:R برابر با ۸۰:۱ در نظر گرفته شد [۱۰]. نمونه‌ها در محلول آبکاری الکترولس نیکل شامل $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ به‌عنوان منبع یون نیکل، $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ به‌عنوان یک عامل کمپلکس‌کننده جهت جلوگیری از رسوب خودبه‌خودی هیدروکسید نیکل، NH_4Cl به‌عنوان عامل بافر برای حفظ pH و $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ به‌عنوان عامل احیا کننده در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا ذرات نیکل روی بستر

پارامترهای S نیز شناخته می‌شوند، توصیف می‌گردند. پارامتر پراکندگی بازتاب و انتقال به ترتیب با S_{11} (یا S_{22}) و S_{12} (یا S_{21}) بیان می‌شوند که از دستگاه VNA به دست می‌آیند [۱۴]. لازم به ذکر است که استفاده از مواد محافظ EMI که سازگار غالب آن‌ها به صورت انعکاس امواج است، می‌تواند منجر به آلودگی موج الکترومغناطیسی ثانویه شود که با اصول حفاظت از محیط زیست در تضاد است؛ زیرا انعکاس امواج به معنای حذف کامل امواج نیست. امواج پس از برخورد به نمونه دوباره به محیط بازمی‌گردند و می‌توانند مشکل آفرین باشند. برای توسعه و بهبود مواد محافظ سازگار با محیط زیست، که اغلب به عنوان محافظ سبز شناخته می‌شوند، کاهش خواص انعکاسی و افزایش قابلیت‌های جذب امواج، امری مهم تلقی می‌شود [۱۵، ۱۶]. یکی از راهکارهای مؤثر افزایش میزان جذب امواج الکترومغناطیسی، افزایش ضخامت نمونه است. زیرا با افزایش ضخامت بستر، امواج الکترومغناطیسی داخل نمونه گیر می‌افتند و در نتیجه میزان جذب امواج داخل نمونه افزایش می‌یابد که منجر به کاهش انتقال و عبور امواج از طریق نمونه می‌شود [۱۷]. محافظت مؤثر EMI کل (SE_{tot}) نمونه مورد بررسی از دو بخش اصلی محافظت از طریق بازتاب امواج (SE_R) و محافظت از طریق جذب امواج (SE_A) بر حسب دسی‌بل (dB) تشکیل شده است. میزان جذب امواج به‌صورت مستقیم از دستگاه VNA قابل دستیابی نمی‌باشد و برای محاسبه آن باید از حاصل تفاضل SE_{tot} و SE_R استفاده

سطوح در تمام عوامل مؤثر در فرایند آبکاری الکترولس گزینش شدند. همچنین زمان آبکاری الکترولس نیکل از لحظه آغاز لایه‌نشانی محاسبه شد. در نهایت، پارچه‌های بی بافت رسانا به دست آمده چندین بار با آب دیونیزه شسته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق خشک شدند. برای بررسی ذرات نیکل لایه نشانی شده، درصد افزایش وزن نمونه‌ها و میزان محافظت EMI آن‌ها پس از فرایند الکترولس نیکل محاسبه شد و با نمونه‌های دیگر مقایسه شد.

لایه‌نشانی شوند. در ضمن pH آن با NH_4OH تنظیم شد. در این پژوهش تأثیر عواملی مانند pH، غلظت نیکل سولفات، نسبت L:R، زمان لایه‌نشانی و ضخامت بستر بی بافت بررسی شد که سطوح و شرایط به کار رفته در جدول ۱ نشان داده شده است. در هر ردیف فقط عامل ذکر شده تغییر کرده و سایر عوامل ثابت‌اند و عامل مورد بررسی در سطوح مختلف تغییر می‌کند. با توجه به هزینه‌بر بودن آزمون میزان محافظت EMI نمونه‌ها، انتخاب سطوح بهینه برای ادامه روند پژوهش، با تعداد محدودی از

جدول ۱- عوامل مؤثر بر فرایند آبکاری الکترولس نیکل

عامل مؤثر	کد	غلظت نیکل سولفات (g/L)	غلظت تری سدیم سیترات (g/L)	غلظت آمونیوم کلرید (g/L)	غلظت سدیم هیپوفسفیت (g/L)	L:R	pH	زمان (min)
pH	pH: 5	70	40	40	60	70:1	~5-6	7
	pH: 7	70	40	40	60	70:1	~7-8	7
	pH: 8	70	40	40	60	70:1	~8-9	7
غلظت نیکل سولفات (g/L)	Ni-60	60	50	40	60	80:1	~8-9	7
	Ni-65	65	50	40	60	80:1	~8-9	7
	Ni-70	70	50	40	60	80:1	~8-9	7
L:R	L:R-80	65	50	40	55	80:1	~8-9	2
	L:R-120	65	50	40	55	120:1	~8-9	2
	L:R-150	65	50	40	55	150:1	~8-9	2
زمان لایه نشانی (min)	Time-0.5	65	50	40	55	80:1	~8-9	0.5
	Time-2	65	50	40	55	80:1	~8-9	2
	Time-15	65	50	40	55	80:1	~8-9	15
ضخامت بستر (mm)	Thick-1	65	50	40	55	80:1	~8-9	2
	Thick-2	65	50	40	55	80:1	~8-9	2
	Thick-3.5	65	50	40	55	80:1	~8-9	2

۳- نتایج و بحث

داده شده است. همان‌طور که پیرامون جدول ۱ نیز بیان شد، در هر ردیف با تغییر عامل ذکر شده در سطوح مختلف، سایر عوامل ثابت مانده و نتایج حاصل از تغییر عامل مورد مطالعه در سطوح مختلف، شامل میزان افزایش

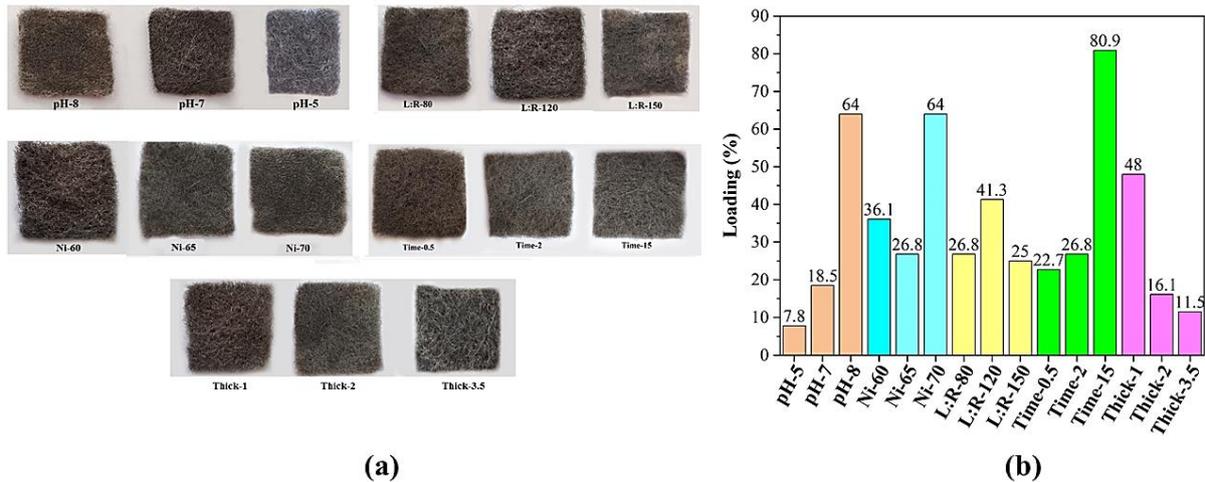
میزان محافظت EMI نمونه‌های تهیه شده به تفکیک میزان محافظت کل، جذب و بازتاب و همچنین نسبت میزان محافظت جذبی به محافظت کل در جدول ۲ نشان

محافظة EMI نمونه‌های مورد بررسی دارد و می‌تواند زمینه‌ای برای بررسی‌های بعدی در جهت بهبود مراحل آزمایشی، اجرایی و افزایش دقت در اندازه‌گیری‌ها فراهم آورد. بنابراین در ادامه به بررسی هر یک از عوامل مؤثر در میزان محافظت EMI نمونه‌های آبکاری شده پرداخته می‌شود. همچنین برای دو عامل غلظت نیکل سولفات و زمان لایه‌نشانی که نسبت به سایر عوامل تأثیر بیشتری داشته و تغییرات آن‌ها محسوس‌تر است، تصویربرداری FESEM برای درک بهتر رفتار آن‌ها ارائه شده است.

وزن و محافظت EMI آن مورد مطالعه قرار گرفته است. تصویر واقعی تمام نمونه‌های مورد بررسی که در پژوهش حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، در شکل ۱-a نشان داده شده است. علاوه بر این، نتایج مربوط به افزایش وزن این نمونه‌ها پس از فرآیند لایه‌نشانی نیکل-فسفر در شکل ۱-b قابل مشاهده است. این نتایج بیانگر این است که چگونه وزن نمونه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف تغییر کرده است و میزان این تغییرات چقدر بوده است. تحلیل این نتایج اهمیت زیادی در درک روند توسعه و بهبود میزان

جدول ۲- نتایج محافظت EMI نمونه‌های تهیه شده

عامل مؤثر	کد	افزایش وزن (%)	محافظت EMI کل (dB)	محافظت EMI بازتابی (dB)	محافظت EMI جذبی (dB)	نسبت محافظت جذبی به کل (%)
pH	pH: 5	7.80	1.91	0.12	1.79	94
	pH: 7	18.50	2.81	0.58	2.24	80
	pH: 8	64.00	8.79	2.43	6.36	72
غلظت نیکل سولفات (g/L)	Ni-60	36.14	49.14	5.48	43.66	89
	Ni-65	26.80	17.42	2.46	14.96	86
	Ni-70	64.00	8.79	2.43	6.36	72
L:R	L:R-80	26.80	17.42	2.46	14.96	86
	L:R-120	41.35	15.75	2.81	12.94	82
	L:R-150	25.00	2.78	0.17	2.60	94
زمان لایه نشانی (min)	Time-0.5	22.67	6.69	1.64	5.05	75
	Time-2	26.80	17.42	2.46	14.96	86
	Time-15	80.86	41.98	3.52	38.46	92
ضخامت بستر (mm)	Thick-1	48.00	14.11	2.40	11.72	83
	Thick-2	26.80	17.42	2.46	14.96	86
	Thick-3.5	11.50	23.33	2.06	21.27	91



شکل ۱: (a) تصویر واقعی نمونه‌های تهیه شده و (b) میزان افزایش وزن نمونه‌های لایه نشانی شده جهت بررسی عوامل مؤثر pH، غلظت نیکل سولفات، نسبت L:R، زمان لایه نشانی و ضخامت بستر بر فرآیند آبکاری الکترولس نیکل.

محافظت EMI با افزایش کم pH از ۷ به ۸ و ورود به منطقه بازی، حدوداً ۳ برابر بیشتر می‌شود. از طرف دیگر، میزان افزایش وزن از ۱۸/۵٪ (نمونه pH: 7) به ۶۴/۰٪ (نمونه pH: 8) می‌رسد که در این جا نیز افزایش ۳ برابری در میزان افزایش وزن مشاهده می‌شود. با افزایش pH محلول، احیا (کاهش) فسفر به تاخیر می‌افتد. این به دلیل تولید یون هیدروکسید در نتیجه واکنش احیا فسفر است. بنابراین افزایش pH محلول باعث کاهش میزان فسفر پوشش می‌شود. همچنین، از آن جایی که واکنش احیا نیکل عمدتاً نرخ لایه‌نشانی (بارگذاری) را کنترل می‌کند، افزایش pH محلول باعث افزایش قدرت احیا کننده هیپوفسفیته و افزایش نرخ لایه‌نشانی می‌شود [۱۹]. هم-چنین با کاهش pH سرعت لایه‌نشانی نیکل کم و مقدار فسفر موجود در پوشش زیاد می‌شود؛ بنابراین میزان محافظت EMI آن کاهش می‌یابد. در پژوهشی که توسط میائو^۱ و همکاران [۲۰] انجام شد، لایه‌های نازک نیکل-

۳-۱- تأثیر pH

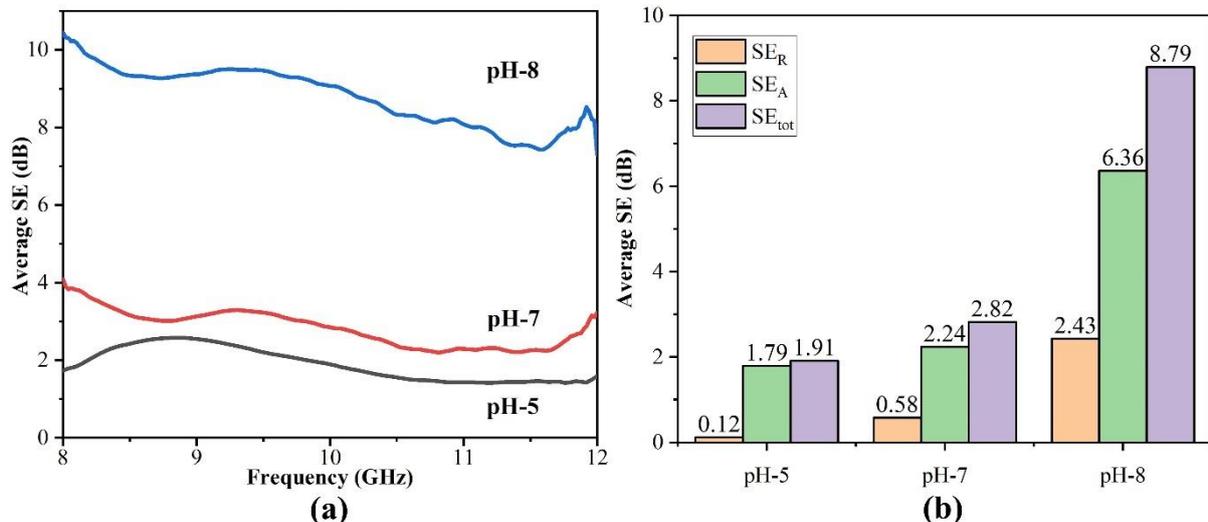
جهت انتخاب pH بهینه، سه سطح مختلف اسیدی (pH: 5)، خنثی (pH: 7) و بازی (pH: 8) از حمام آبکاری الکترولس انتخاب شدند. میزان محافظت EMI کل نمونه‌های pH: 5، pH: 7 و pH: 8 در شکل ۲-a نشان داده شده است. همچنین میزان محافظت EMI این نمونه‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A) در شکل ۲-b قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در pH های اسیدی فرآیند الکترولس نیکل به خوبی انجام نشده و میزان بارگذاری نیکل و میزان محافظت EMI بسیار کمی حاصل می‌شود؛ ولی با افزایش pH تا ۸، فرآیند الکترولس بهتر انجام شده و درصد افزایش وزن و محافظت EMI بهتری به دست می‌آید. در بررسی تأثیر pH، نتایج نشان داد که در pH: 5، محافظت EMI برابر با ۱/۹۱ dB بوده و بارگذاری نیکل ۷/۱۸ است. با افزایش pH به ۸، محافظت EMI به ۸۰/۹ dB و درصد افزایش وزن به ۶۴/۰٪ می‌رسد. میزان

^۱ Miao

شود، اما نسبت میزان محافظت جذبی به محافظت کل (SE_A/SE_{tot}) کاهش می‌یابد و از میزان ۹۴٪ در نمونه pH: 5 به ۷۲٪ در نمونه pH: 8 می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان این گونه بیان کرد که طبق نتایج به‌دست آمده، سرعت واکنش احیای نیکل توسط سدیم هیپوفسفات و قدرت احیا کنندگی آن در pH های بالا، افزایش می‌یابد. این موضوع منجر به افزایش سرعت و تراکم لایه‌نشانی نیکل روی سطح الیاف می‌شود و احتمالاً پوشش فلزی ضخیم‌تر و یکنواخت‌تری روی سطح بستر تشکیل می‌شود که باعث افزایش رسانایی سطح می‌شود و در نتیجه سهم بازتاب امواج در میزان محافظت EMI کل بیشتر می‌شود، هرچند میزان محافظت کل افزایش می‌یابد.

فسفر به روش الکترولس بر روی سطح سیلیکونی در محلول‌های قلیایی سیترات تولید شدند. تأثیر شیمی حمام و متغیرهای آبکاری بر ترکیب شیمیایی، سرعت رسوب، مورفولوژی و پایداری حرارتی لایه‌های نازک نیکل-فسفر در آبکاری الکترولس بر روی ویفرهای سیلیکونی مورد مطالعه قرار گرفت. در مطالعه تأثیر pH مشاهده شد که با افزایش pH، میزان فسفر موجود در نمونه‌ها نیز روند صعودی داشته و به مرور بیشتر می‌شود. هم‌چنین تا pH: 10 تغییرات وزن نمونه‌ی مورد بررسی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود، علی‌رغم این که با افزایش pH، میزان محافظت EMI بیشتر می-



شکل ۲: (a) میزان محافظت EMI نمونه‌های pH: 5، pH: 7 و pH: 8 و (b) میزان محافظت EMI این نمونه‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A).

4000X نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌ها تقریباً یک لایه ثابت و یکپارچه در سراسر سطوح الباف پوشش داده شده است. ذرات نیکل-

۳-۲- تأثیر غلظت نیکل سولفات

تصاویر FESEM مربوط به نمونه‌های Ni-60، Ni-65 و Ni-70 به ترتیب در شکل‌های ۳-a تا ۳-c با بزرگنمایی

توجهی نیز داشته است. این رفتار می‌تواند احتمالاً ناشی از عواملی مانند کاهش پایداری محلول باشد. به عبارت دیگر، ذرات نیکل-فسفر در محلول به‌جای لایه‌نشانی روی بستر، شروع به رسوب در حجم محلول کند. به نظر می‌رسد که در نمونه Ni-65 رسوب ناهمگن یا توده‌ای در محلول و در نتیجه کاهش اثربخشی لایه‌نشانی یکنواخت بر سطح بستر رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد که در این غلظت، واکنش احیا و رسوب نیکل به سمت افزایش نرخ هسته‌گذاری یا جوانه‌زنی می‌رود و رشد آن‌ها کندتر است. بنابراین به‌جای یک فیلم یکنواخت و ضخیم، تعداد زیادی ذرات ریز و پراکنده روی سطح تشکیل می‌شود. در کنار این موضوع، به نظر می‌رسد بعضی از ذرات نیکل-فسفر که پیوند ضعیفی با بستر داشته‌اند، از آن جدا و در محلول پخش شده‌اند. در غلظت 7.0 g/L ، افزایش وزن مجدداً به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت که می‌تواند حاصل از رسوب سریع و شدید یون نیکل در حالت شبه اشباع شده باشد و احیای نیکل سریع‌تر رخ دهد. به عبارت دیگر، در نزدیکی سطح بستر یا در حجم کوچک محلول در فرآیند الکترولس به‌دلیل سرعت بالای احیای ذرات نیکل و کاهش احتمالی پایداری کمپلکس، به‌نظر می‌رسد که حالت گذرا و موقتی اشباع مانند می‌تواند رخ دهد که منجر به تشکیل رسوب توده‌ای در محلول و کاهش لایه‌نشانی یکنواخت و همگن شود. هم‌چنین ذرات نیکل-فسفر موجود می‌توانند با ذراتی که قبلاً لایه‌نشانی شدند، پیوند برقرار کرده و جذب آن‌ها شوند و ضخامت و میزان ذرات پوشش داده شده بیشتر شود. با این حال، این

فسفر پوشش داده شده در نمونه‌های Ni-60 و Ni-65 تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند؛ اما در نمونه Ni-70 تجمعات این ذرات بیشتر شده و سطوح یکنواخت کمتر قابل مشاهده می‌باشد. در ابتدای لایه‌نشانی به‌دلیل انجام واکنش‌های حساس‌سازی و فعال‌سازی روی سطح بستر بی‌بافت، به نظر می‌رسد که سرعت انجام واکنش‌های شیمیایی بین اتم‌های سطح بستر و ذرات نیکل-فسفر بالا بوده و به سرعت جذب بستر می‌شوند و سپس به هم متصل شده و تقریباً یک لایه یکنواخت تشکیل می‌دهند. بعد از آن ذراتی که لایه‌نشانی می‌شوند، می‌توانند جذب ذرات دیگر شوند. از این‌رو در برخی از مناطق نمونه‌های Ni-60 و Ni-65 تجمعات کوچک مشاهده می‌شود؛ در حالی که در برخی از نواحی نمونه Ni-70 تجمعات بسیار بیشتری از این ذرات وجود دارد. هم‌چنین ظاهراً در نمونه Ni-65 شکستگی لایه پوشش داده شده بیشتر از سایر نمونه‌ها باشد و پوشش کمتری ایجاد شده است. میزان ذرات پوشش داده شده در نمونه Ni-70 بیشتر از دیگران است. میزان محافظت EMI کل نمونه‌های Ni-60، Ni-65 و Ni-70 و هم‌چنین میزان محافظت EMI آن‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{rot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A) به ترتیب در شکل ۳-d و ۳-e نشان داده شده است. در شرایط معمول انتظار می‌رود که با افزایش غلظت یون فلزی نیکل در محلول، میزان رسوب‌گذاری و لایه‌نشانی روی بستر افزایش یابد. با این حال، نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نیکل سولفات از ۶۰ به 65 g/L ، میزان افزایش وزن نه تنها بیشتر نشده بلکه کاهش قابل

افزایش جرم الزاماً به معنای بهبود کیفیت پوشش نیست. با وجود افزایش وزن در غلظت 70 g/L عملکرد محافظتی EMI نمونه کاهش یافته است. این نتیجه ممکن است به دلیل این باشد که افزایش سریع و غیرکنترل‌شده رسوب به تشکیل ساختارهای متخلخل یا شکاف‌دار منجر شده باشد که مسیرهای پیوسته و رسانای الکتریکی را مختل می‌کند. هم‌چنین در غلظت‌های بالا، احتمال تجمع ذرات نیکل و تشکیل نیکل به صورت ذرات درشت یا خوشه‌ای افزایش می‌یابد که از یکنواختی و پیوستگی لایه می‌کاهد. از طرف دیگر، افزایش سهم ذرات نیکل در غلظت بالاتر نیکل سولفات و محدودیت در احیای نیکل ناشی از سدیم هیپوفسفات ممکن است منجر به کاهش کیفیت آبکاری شود و حتی احتمالاً درصد فسفر موجود در نمونه بیشتر شود. به طور کلی، میزان افزایش وزن و محافظت EMI در غلظت نیکل سولفات 60 g/L به ترتیب برابر با $36/14\%$ و $49/14 \text{ dB}$ است؛ به صورتی که این نمونه توانایی انسداد امواج تابیده شده تا $99/999\%$ را دارا می‌باشد. با افزایش غلظت نیکل سولفات از 65 g/L به 70 g/L ، بارگذاری نیکل-فسفر از $26/8\%$ به $64/0\%$ افزایش می‌یابد، اما محافظت EMI از $17/42$ به $8/79 \text{ dB}$ کاهش می‌یابد.

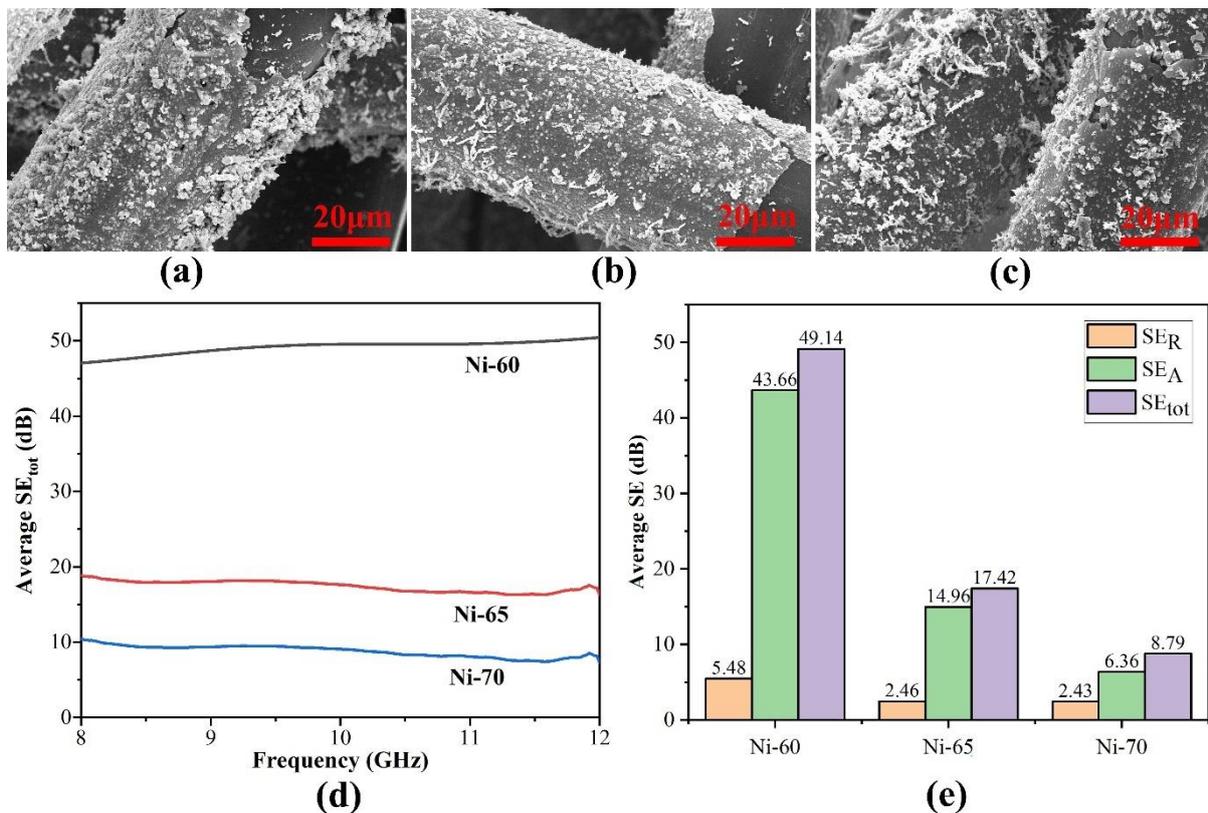
به طور کلی می‌توان اظهار داشت که کاهش وزن نمونه در غلظت 65 g/L نیکل سولفات الزاماً به معنای رسوب گسترده نیکل-فسفر در حجم محلول نیست، بلکه می‌تواند ناشی از تعادل ظریف میان نرخ احیا، پایداری کمپلکس‌ها و یکنواختی هسته‌زایی روی بستر باشد. در غلظت 60 g/L ، غلظت یون‌های نیکل کم است اما به نظر می‌رسد که

محلول پایدارتر بوده و رسوب ناهمگن و کلوخه‌ای مانند کمتری رخ می‌دهد. در غلظت 70 g/L ، اگرچه احتمال رسوب ذرات در محلول وجود دارد، اما به دلیل اشباع بودن سطح الیاف و افزایش تعداد هسته‌های فعال، بخشی از ذرات نیکل-فسفر هم‌چنان روی بستر رسوب کرده، لایه-نشانی می‌شود و وزن آن افزایش می‌یابد. با این حال میزان محافظت EMI کاهش یافته است که نشان می‌دهد پوشش یکنواخت و پیوسته نبوده است. این نایکنواختی تأییدی بر رسوب‌های توده‌ای و غیرمؤثر است. بنابراین تفاوت میان نمونه Ni-60 با Ni-65 و Ni-70 تنها به رسوب در محلول محدود نمی‌شود، بلکه به رقابت بین هسته‌زایی در سطح الیاف، پایداری محلول و تشکیل ساختارهای توده‌ای مربوط است. این رفتار غیرخطی در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است. در پژوهشی توسط میائو و همکاران [۲۰]، لایه‌های نازک نیکل-فسفر به روش الکترولس بر روی سطوح سیلیکونی تولید شد. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش غلظت نیکل، علی‌رغم این که روند تغییرات وزن به طور صعودی است، اما این نرخ تغییرات خطی نیست و در غلظت‌های میانی، میزان تغییرات وزن کاهش یافته و مجدداً با افزایش بیشتر غلظت نیکل، تغییرات وزن صعودی می‌شود. هم‌چنین روند غیر خطی در تغییرات افزایش وزن با تغییر مقادیر عوامل دیگر از جمله دمای حمام آبکاری و pH مشاهده شد.

هم‌چنین با افزایش غلظت نیکل سولفات از نمونه Ni-60 به Ni-70 نسبت SE_A/SE_{tot} نیز همراه با کاهش میزان

نیکل در سطح نمونه مسیر نفوذ و جذب امواج را مسدود می‌کنند و بازتاب بیشتر می‌شود. از طرفی پوشش‌های ناقص و غیر یکپارچه روی سطح نمونه، بازتاب مؤثری نیز ارائه نمی‌دهند که همان‌طور که مشاهده شد، میزان محافظت کل نیز با افزایش غلظت نیکل سولفات کاهش می‌یابد.

محافظت EMI، کمتر می‌شود. در واقع به‌نظر می‌رسد که با افزایش بیش از حد غلظت نیکل سولفات، واکنش احیای نیکل سریع‌تر رخ دهد که این سرعت بالا می‌تواند باعث لایه‌نشانی ناهمگن و نایکنواخت‌تر ذرات نیکل روی بستر شود و احتمالاً تجمع‌هایی روی بستر رخ دهد. در نتیجه احتمالاً ذرات نیکل و به‌خصوص تجمعات ذرات



شکل ۳: تصاویر اختصاص یافته به نمونه‌های (a) Ni-60، (b) Ni-65 و (c) Ni-70، (d) میزان محافظت EMI کل نمونه‌های Ni-60، Ni-65 و Ni-70 و (e) میزان محافظت EMI آن‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A).

L:R-150 می‌باشد. علاوه بر آن، میزان محافظت EMI این نمونه‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A) در شکل ۴-b قابل مشاهده است. در نسبت L:R برابر با ۸۰:۱، محلول الکترولس غلظت بیشتری دارد و میزان یون نیکل بیشتری نسبت به وزن پارچه در تماس

۳-۳- تأثیر نسبت L:R

به نظر می‌رسد که تأثیر نسبت L:R تاکنون به‌طور دقیق در پژوهشی مورد مطالعه قرار نگرفته یا تحقیقات پیرامون آن بسیار اندک است. شکل ۴-a نشان‌دهنده میزان محافظت EMI کل نمونه‌های L:R-80، L:R-120 و

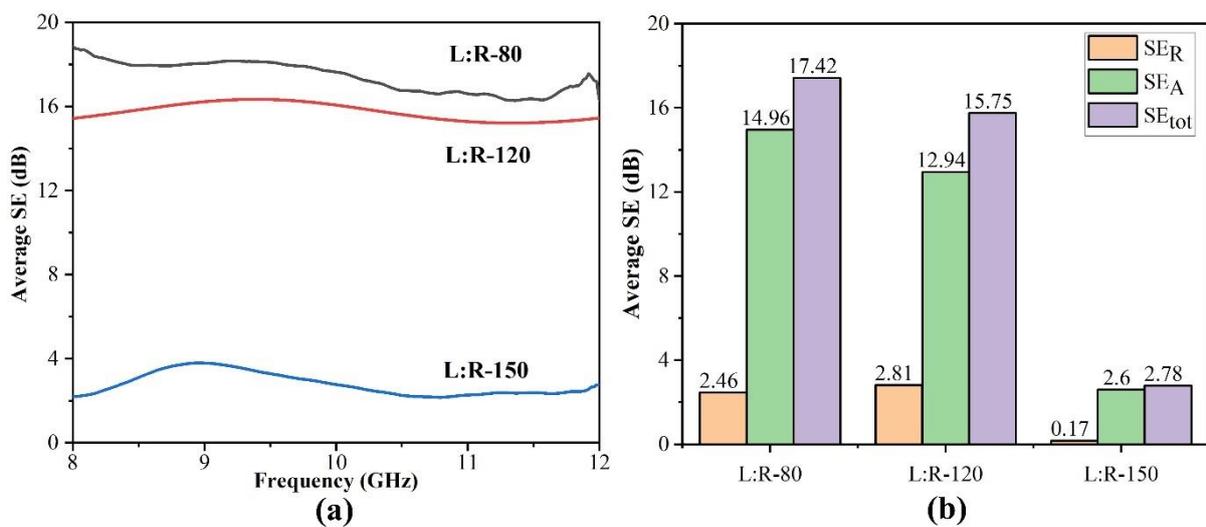
L:R که نمونه تقریباً به‌طور کامل درون حمام آبکاری الکترولس غوطه‌ور می‌شود، برابر با ۱:۷۰ است.

در نسبت ۱:۸۰، اگر چه افزایش وزن کمتر است، اما پوشش احتمالاً متراکم‌تر و پیوسته‌تر بوده و این باعث عملکرد مناسب‌تر در حفاظت EMI شده است و به ۱۷/۴۲ dB رسیده است. در نسبت ۱:۱۲۰، پوشش ضخیم‌تر شده ولی احتمالاً کمی از یکنواختی یا پیوستگی الکتریکی آن کاسته شده است. به همین دلیل، با وجود افزایش جرم لایه‌نشانی شده، کارایی EMI اندکی کاهش یافته است و به ۱۵/۷۵ dB دست یافته است. در نسبت ۱:۱۵۰، کاهش قابل توجه کارایی EMI مشاهده شده است؛ به‌صورتی که میزان محافظت EMI به ۲/۷۸ رسیده است. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش قابل ملاحظه غلظت مؤثر یون‌های نیکل در مجاورت سطح نمونه یا به‌عبارت دیگر رسوب ناقص یا ناپیوسته ذرات نیکل روی نمونه باشد که احتمال تشکیل ساختار ناهمگن یا پوشش گسسته وجود دارد که می‌تواند باعث قطع مسیره‌های هدایت الکتریکی و تضعیف جذب/بازتاب امواج الکترومغناطیسی شود. هم‌چنین چون زمان لایه‌نشانی در هر ۳ نمونه یکسان است، احتمال کاهش نرخ برخورد یون‌های فعال با سطح به‌علت افزایش بیش از حد حجم محلول در نتیجه رسوب ناکافی یا دیرهنگام ذرات نیکل وجود دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت L:R از نمونه L:R-80 تا L:R-120، نسبت SE_A/SE_{Tot} کاهش جزئی دارد و از مقدار ۸۶٪ به ۸۲٪ می‌رسد. اما با افزایش مجدد نسبت L:R، با وجود کاهش نسبتاً شدید محافظت EMI، اما نسبت SE_A/SE_{Tot}

مستقیم قرار می‌گیرد. اما احتمال کاهش نفوذپذیری به درون ساختار پارچه و ایجاد رسوب سطحی سریع و ناقص وجود دارد که موجب افزایش وزن نسبتاً کمتر شده و برابر با ۲۶/۸۰٪ است. در نسبت ۱:۱۲۰، به‌نظر می‌رسد شرایط بهینه‌تری از نظر توزیع یکنواخت یون‌ها، سرعت احیای کنترل‌شده و نفوذپذیری مناسب درون ساختار حاصل شده باشد که منجر به افزایش وزن بیشتر و احتمالاً پوشش یکنواخت‌تر شده است و افزایش وزن برابر با ۴۱/۳۵٪ است. در نسبت ۱:۱۵۰، حجم محلول الکترولس نسبت به وزن نمونه بیش از حد افزایش یافته و به‌نظر می‌رسد که غلظت مؤثر یون نیکل در واحد سطح کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند باعث کاهش نرخ کلی لایه‌نشانی، رقیق‌شدن محلول موجود در اطراف نمونه و افزایش فاصله مؤثر انتقال جرم شود. در نتیجه افزایش وزن نیز به ۲۵/۰۰٪ کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش نسبت L:R به نظر می‌رسد که غلظت مواد و به‌خصوص نیکل در حمام الکترولس کم شده و در زمان مشابه محدود در هر دو نمونه، ذرات نیکل کمتری روی بستر لایه نشانی می‌شود. علاوه بر این در تعیین L:R کران پایین نیز وجود دارد. به عبارت دیگر، نمی‌توان L:R را نیز به‌صورت نامحدود کاهش داد. زیرا برای آبکاری و لایه نشانی (بارگذاری) یکنواخت ذرات نیکل روی نمونه بی‌بافت، باید نمونه به‌صورت کامل درون حمام آبکاری الکترولس نیکل غوطه‌ور باشد. طبق اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌های انجام شده، مشخص شد که کمترین مقدار

مرحله بعد که نسبت L:R مجدداً افزایش می‌یابد، باعث می‌شود ذرات نیکل بسیار پراکنده، ناپیوسته و سطحی روی بستر لایه‌نشانی شوند. در نتیجه تقریباً بازتاب امواج نمی‌تواند رخ دهد و موج راحت‌تر وارد ساختار بی‌بافت می‌شود و مقدار زیادی از آن از نمونه عبور می‌کند؛ اما به دلیل تخلخل‌های موجود در ساختار بی‌بافت و ذرات نیکل موجود در آن، برخی از امواج داخل ساختار بی‌بافت جذب شده و به عبارتی ساختار بی‌بافت نقش جذب کننده اصلی امواج را دارد و چون تقریباً بازتابی انجام نشده و پوشش فلزی مؤثری ندارد، بیشتر محافظت از طریق جذب امواج صورت می‌گیرد.

افزایش یافته و به ۹۴٪ می‌رسد. دلیل این روند تغییرات در نسبت SE_A/SE_{tot} می‌توان این‌گونه بیان کرد که ابتدا وقتی نسبت L:R افزایش می‌یابد، با افزایش حجم محلول الکترولس، غلظت مؤثر نیکل در اطراف سطح الیاف بستر کاهش می‌یابد که باعث رسوب و لایه‌نشانی ضعیف‌تر و تقریباً ناقص نیکل می‌شود. در نتیجه احتمالاً پوشش ناقص و ناهمگنی روی سطح ایجاد می‌شود که باعث کاهش هدایت الکتریکی و در نتیجه میزان محافظت EMI می‌شود و به نظر می‌رسد به دلیل پراکندگی‌ها و تجمع‌های ذرات نیکل، میزان بازتاب امواج بیشتر باشد و از روی مقدار نسبت SE_A/SE_{tot} به دست آمده نیز مشخص است که مقدار جذب امواج کمتر از بازتاب آن‌ها است. ولی در



شکل ۴: (a) میزان محافظت EMI کل نمونه‌های L:R-80، L:R-120 و L:R-150 و (b) میزان محافظت EMI آن‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A).

بزرگنمایی 4000X قابل مشاهده است. در نمونه Time-0.5 یک لایه نازک پوشش داده شده وجود دارد که یکپارچگی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد و

۳-۴- تأثیر زمان لایه‌نشانی

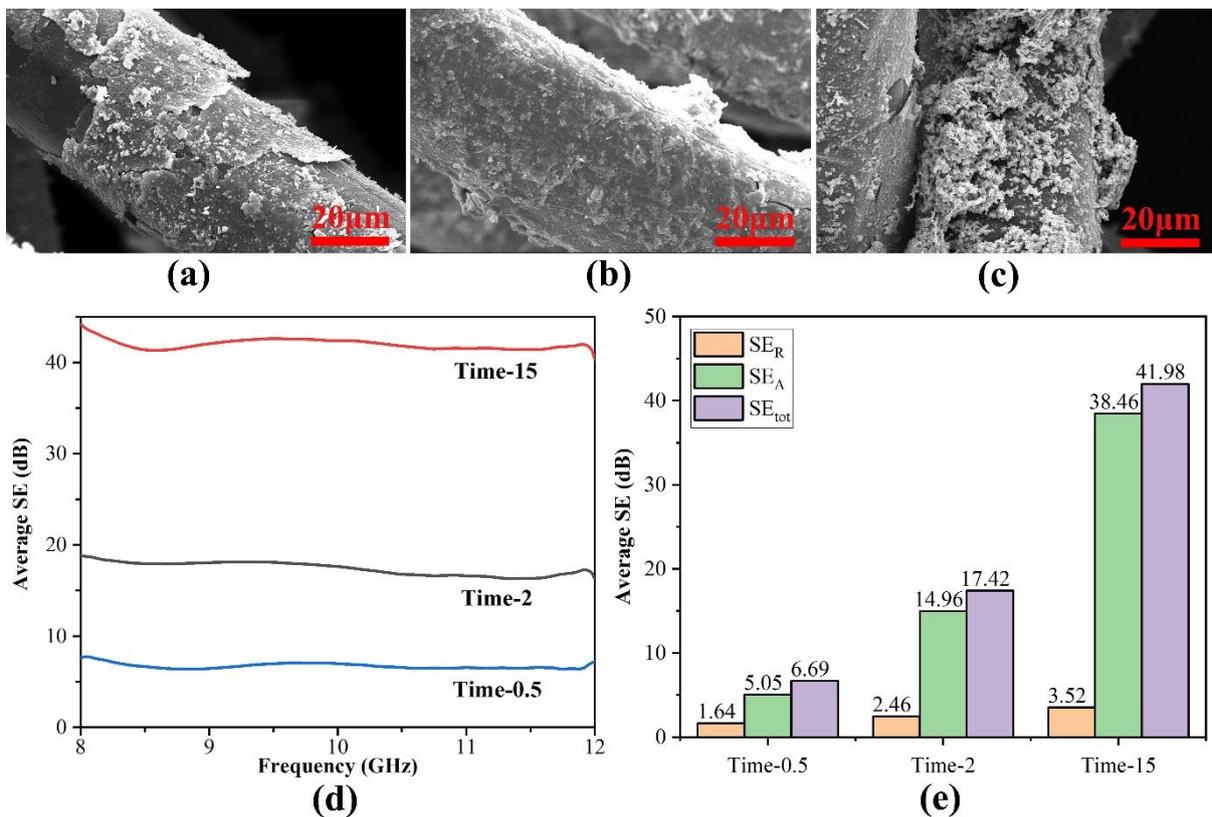
تصاویر FESEM مرتبط با نمونه‌های Time-0.5، Time-2، و Time-15 به ترتیب در شکل‌های ۵-a تا ۵-c با

شکستگی لایه پوشش داده شده در برخی مناطق نیز مشخص است. در نمونه Time-2 تقریباً یک لایه یکپارچه روی سطح الیاف پوشش داده شده است. در نمونه Time-15 لایه پوشش داده شده به‌نظر می‌رسد تقریباً یکنواخت و یکپارچه بوده و نسبت به نمونه Time-2 ضخیم‌تر است. علاوه بر این، در برخی از نواحی سطوح الیاف، تجمعاتی از ذرات نیکل-فسفر نمایان است. هم‌چنین نواحی کوچکی از سطح الیاف نیز فاقد پوشش بوده یا پوشش کمی دارد. این احتمالاً به این دلیل است که در ابتدای فرآیند سرعت لایه‌نشانی ذرات نیکل-فسفر روی سطح الیاف بالاست و یک لایه یکپارچه‌ای به مرور و با گذشت زمان تشکیل می‌شود و پس از آن ذرات احیا شده جدید روی این ذرات پوشش داده شده، لایه‌نشانی شده و جذب ذرات یکدیگر می‌شوند. اما در زمان بیشتر، ذرات لایه‌نشانی شده روی بستر که پیوند ضعیفی با سطح داشتند، در مدت ۱۵ دقیقه آبکاری الکترولس، طی چرخش نمونه در محلول آبکاری الکترولس توسط همزن حرارتی از سطح جدا شده و در محلول پخش شده‌اند. هم‌چنین ذراتی که با یکدیگر پیوند قوی برقرار کردند، در برخی مناطق به‌صورت دسته‌ای از سطح جدا شده‌اند. اما در مدت ۱۵ دقیقه آبکاری الکترولس نیکل، ذرات نیکل-فسفر نسبتاً زیادی علاوه بر بستر، بر روی یکدیگر نیز لایه‌نشانی شده‌اند و پوشش نسبتاً ضخیمی با گذشت زمان روی پارچه بی‌بافت ایجاد شده است که می‌تواند هم افزایش وزن قابل توجه و هم میزان محافظت نسبتاً بالایی ارائه دهد. میزان محافظت EMI کل نمونه‌های Time-0.5، Time-2 و Time-15 و

هم‌چنین میزان محافظت EMI آن‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A) به‌ترتیب در شکل ۵-d و ۵-e قابل مشاهده است. آبکاری الکترولس یک فرآیند وابسته به زمان بوده که نیازی به اعمال جریان خارجی ندارد. در این فرآیند، یون‌های فلزی (Ni^{2+}) به‌صورت تدریجی روی سطح بستر بی‌بافت نایلون احیا شده و لایه‌نشانی انجام می‌شود. نمونه هرچه مدت زمان بیشتری در محلول الکترولس باقی بماند، یون‌های بیشتری فرصت خواهند داشت که احیا شده و روی سطح بنشینند. بنابراین افزایش زمان منجر به رشد تدریجی و پیوسته لایه فلزی شده که در نتیجه باعث افزایش وزن کلی نمونه می‌گردد و رابطه‌ی تقریباً مستقیم میان زمان و مقدار نیکل-فسفر لایه‌نشانی شده دیده می‌شود. بدیهی است که با افزایش زمان ضخامت پوشش افزایش می‌یابد و در نتیجه امکان ایجاد مسیرهای رسانای بهتر در سطح نمونه فراهم می‌شود. بنابراین لایه فلزی فرصت بیشتری برای پوشاندن کامل سطح الیاف و حفرات یا تخلخل‌های نمونه را دارد. این عوامل موجب افزایش مؤثر در بازتاب و جذب امواج الکترومغناطیسی می‌شوند. در مطالعه تأثیر زمان لایه‌نشانی، در ۰/۵ دقیقه، ۲ دقیقه و ۱۵ دقیقه، محافظت EMI به ترتیب برابر با ۶/۶۹، ۱۷/۴۲ و ۴۱/۹۸ dB بود. از طرف دیگر افزایش وزن این نمونه‌ها به‌ترتیب به مقادیر ۰/۲۲/۶۷٪، ۰/۲۶/۸٪ و ۰/۸۰/۸۶٪ رسیدند، که نشان‌دهنده توانایی مسدود کردن ۹۹/۹۹٪ امواج الکترومغناطیسی تابیده شده در نمونه Time-15 است. به‌عبارت دیگر، با افزایش زمان آبکاری الکترولس، میزان

که با افزایش زمان لایه‌نشانی نیکل-فسفر، نسبت SE_A/SE_{tot} نیز افزایش می‌یابد. در واقع در زمان‌های کوتاه فقط یک پوشش سطحی توسط لایه‌نشانی ذرات نیکل-فسفر روی سطح بستر ایجاد می‌شود که احتمالاً خاصیت بازتاب امواج نسبتاً بیشتری دارد. اما با افزایش زمان، ذرات نیکل احیا شده درون محلول الکترولس فرصت بیشتری برای نفوذ به ساختار درونی بی‌بافت دارد و پوشش پیوسته‌تر و ضخیم‌تری شکل می‌گیرد و جذب امواج بیشتری صورت می‌گیرد.

محافظت EMI بیشتر می‌شود. در پژوهشی توسط صدیقی و همکاران [۱۲]، پارچه محافظی از طریق پوشش‌دهی مگنتیت (Fe_3O_4)، گرافن اکسید احیا شده (rGO) و پلی-آنیلین و همچنین آبکاری الکترولس نیکل-فسفر بر روی بی‌بافت پلی‌استر تهیه شد. نتایج حاکی از این است که بیشترین سهم در رسانایی الکتریکی به دلیل وجود ذرات نیکل است و با افزایش زمان آبکاری الکترولس، رسانایی الکتریکی و در نتیجه میزان محافظت EMI پارچه محافظ مورد بررسی افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود



شکل ۵: تصاویر FESEM مرتبط با نمونه‌های (a) Time-0.5، (b) Time-2 و (c) Time-15 (d) میزان محافظت EMI کل نمونه‌های Time-0.5، Time-2 و Time-15 و (e) میزان محافظت EMI آن‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A).

در شکل ۶-a میزان محافظت EMI کل نمونه‌های Thick-

1، Thick-2 و Thick-3.5 قابل مشاهده است. همچنین

۳-۵- تأثیر ضخامت بستر

واکنش نمی‌شوند. به بیان دیگر، در پارچه‌های بی‌بافت ضخیم‌تر، نفوذ ذرات نیکل-فسفر به درون لایه‌های داخلی دشوارتر می‌شود. این موضوع منجر به این می‌شود که پوشش نیکل بیشتر روی سطح خارجی تشکیل شود و عمق کمتری از نمونه را درگیر کرده و نفوذ کند. بنابراین کل وزن فلز لایه‌نشانی شده در مقایسه با وزن بیشتر نمونه، کاهش نسبی دارد. در نتیجه، با اینکه وزن کل نمونه بیشتر شده است، ولی مقدار نیکل-فسفر رسوب‌کرده نسبت به آن کمتر است و بنابراین درصد افزایش وزن کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر، به‌طور کلی با افزایش ضخامت نمونه، محافظت EMI نیز بیشتر می‌شود. اما باید توجه داشت که افزایش کورکورانه ضخامت برای خواص حفاظتی برتر منجر به مسائل بالقوه‌ای مانند پیچیده‌تر شدن فرآیندهای ساخت و افزایش هزینه‌ها می‌شود [۲۱]. میزان محافظت EMI نمونه Thick-1، Thick-2 و Thick-3.5 به ترتیب برابر با ۱۴/۱۱، ۱۷/۴۲ و ۲۳/۳۳ dB است. بنابراین، می‌توان گفت که احتمالاً ضخامت بیشتر عامل اصلی محافظت EMI بالاتر در نمونه Thick-3.5 است. می‌توان گفت که با افزایش ضخامت بستر، حفرات و تخلخل‌های موجود در نمونه بی‌بافت، متراکم‌تر و پیچیده‌تر شده و اثر بازتاب چندگانه^۱ و جذب در لایه‌های درونی نمونه (جذب چندلایه) می‌تواند رخ دهد. در نمونه‌های ضخیم‌تر با وجود این‌که احتمال دارد نفوذ کامل نیکل در کل عمق نمونه رخ ندهد و افزایش وزن کمتری داشته باشد، اما ساختار

میزان محافظت EMI این نمونه‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot}) ، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A) در شکل b-۶ نشان داده شده است. در بررسی عامل ضخامت بر میزان افزایش وزن و میزان محافظت EMI، با افزایش ضخامت نمونه از ۱ میلی‌متر (Thick-1) به ۲ میلی‌متر (Thick-2)، یک کاهش نسبتاً شدید در درصد افزایش وزن مشاهده می‌شود و از مقدار ۴۸/۰۰٪ به ۲۶/۸۰٪ می‌رسد. نمونه Thick-3.5 با ضخامت ۳/۵ میلی‌متر نیز مجدداً میزان افزایش وزن آن کاهش یافته و به ۱۱/۵۰٪ می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت از ۲ به ۳/۵ میلی‌متر، کاهش افزایش وزن هم‌چنان ادامه دارد، اما نسبت به حالت قبل کمتر است. این موضوع بیانگر این است که بیشتر محدودیت‌های نفوذ سطحی ذرات نیکل-فسفر در ضخامت ۲ میلی‌متر ظاهر شده‌اند و افزایش بیشتر ضخامت فقط باعث افزایش وزن داخلی نمونه می‌شود که تقریباً در واکنش آبکاری الکترولس غیرفعال است و رسوب قابل‌توجهی در عمق نمونه ایجاد نمی‌شود. این کاهش را می‌توان با در نظر گرفتن چند عامل توضیح داد: در نمونه‌های نازک‌تر، نسبت سطح قابل‌دسترس برای لایه‌نشانی نیکل نسبت به وزن کل بیشتر است. یعنی بخش زیادی از وزن نمونه در تماس مستقیم با محلول قرار دارد و نیکل-فسفر می‌تواند روی آن رسوب کند. به عبارت دیگر نسبت سطح به حجم بیشتری دارد. اما وقتی ضخامت افزایش می‌یابد، درصد زیادی از وزن نمونه در لایه‌ها و بخش‌های داخلی نمونه قرار می‌گیرد که یا به سختی در تماس با محلول قرار می‌گیرند یا اصلاً درگیر

^۱ Multiple reflection

۸۶٪ در نمونه Thick-2 می‌رسد و با افزایش بیشتر ضخامت افزایش پیدا می‌کند و در نمونه Thick-3.5 به ۹۱٪ می‌رسد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با ضخیم‌تر شدن ساختار بی‌بافت، حتی اگر پوشش ذرات نیکل محدود به سطح باشد، ضخامت زیاد، مسیرهای پیچیده و تداخل‌های بیشتر موجود در داخل نمونه باعث افزایش بازتاب‌های چندگانه داخلی و جذب بیشتر امواج می‌شود و در نتیجه سهم جذب از محافظت کل EMI (SE_A/SE_{tot}) بالا می‌رود.

جدول ۳ مقایسه‌ای بین میزان محافظت EMI نمونه Time-15 و Ni-60 از این پژوهش (به عنوان دو نمونه اصلی با بالاترین میزان محافظت EMI) و پژوهش‌های مشابه را نشان می‌دهد. توجه به این نکته مهم است که تغییرات در ضخامت نمونه‌های مورد مطالعه، مقایسه صحیح عملکرد محافظت EMI را پیچیده می‌کند. بنابراین، برای پرداختن به این موضوع، از محافظت مؤثر نسبی ضخامت بر حسب دسی‌بل/ میلی‌متر (SSE_t) برای ارزیابی صحیح و منطقی میزان محافظت EMI در تمام مواد ذکر شده استفاده شده است. بنابراین محافظت مؤثر نسبی ضخامت به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود؛ به-طوری‌که t ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر است [۲۴].

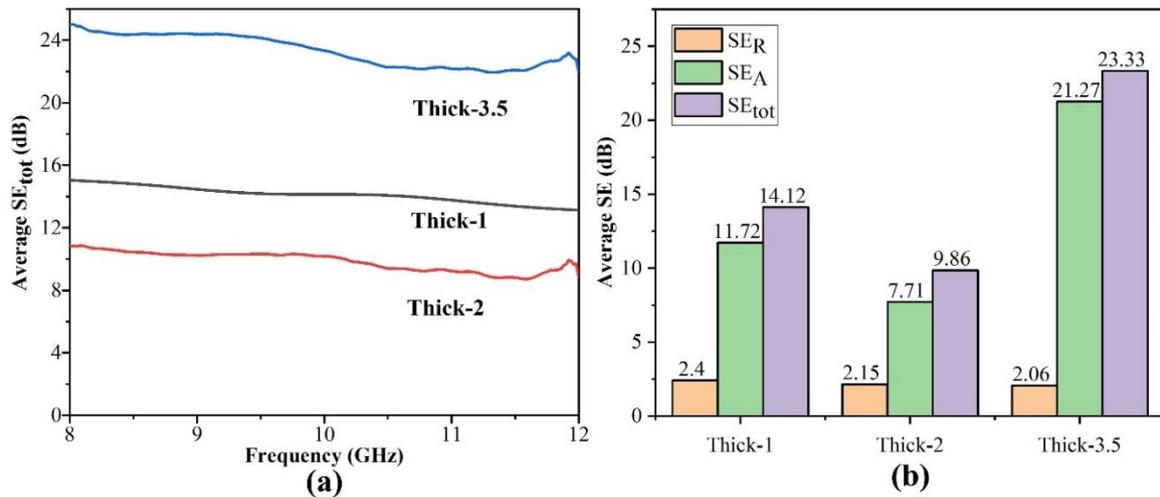
$$SSE_t = \frac{EMI_{SE}}{t} \quad (5)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های تهیه شده در این پژوهش به خوبی با سایر مطالعات انجام شده قبلی قابل مقایسه است.

ضخیم و متخلخل پارچه بی‌بافت می‌تواند به‌عنوان یک جاذب موج چندلایه عمل کند و بازتاب چندگانه به خوبی داخل آن رخ دهد؛ یعنی حتی اگر فقط بخش‌های سطحی رسانا باشند، ساختار ضخیم نمونه Thick-3.5 می‌تواند امواج را در داخل خود به دام انداخته و تدریجاً جذب کند. همچنین با ضخامت زیادتر موجود، مسیر حرکت موج داخل نمونه بی‌بافت پیچیده‌تر و طولانی‌تر می‌شود. این باعث می‌شود که امواج در داخل نمونه بیشتر پخش شوند و انرژی آن‌ها طی مسیر کاهش یابد و باعث استهلاک و پراکندگی بیشتر موج می‌شود. در پژوهشی توسط یین^۱ و همکاران [۲۲]، پلی‌آنیلین و مکسین $Ti_3C_2T_x$ بر روی پارچه کربنی پوشش دهی شدند. میزان محافظت EMI نمونه تهیه شده برابر با ۳۵/۳ dB بود. با افزایش ضخامت نمونه (استفاده از پارچه کربنی سه‌لایه) و استفاده از مقادیر ثابت قبلی پلی‌آنیلین و مکسین، محافظت EMI به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و به ۶۱/۳ dB رسید. در پژوهش دیگری توسط ژائو^۲ و همکاران [۲۳]، یک کامپوزیت پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF)/ نیکل با محتوای نیکل متفاوت ساخته شد. برای فیلم کامپوزیت با مقدار ثابت ۶ درصد وزنی نیکل، در ضخامت‌های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ میلی‌متر، میانگین محافظت EMI به ترتیب به ۱۵/۴، ۲۴/۷، ۳۰/۳ و ۳۵/۴ dB رسید. روند تغییر نسبت SE_A/SE_{tot} مشابه رفتار تغییر میزان محافظت EMI است؛ یعنی با افزایش ضخامت نمونه این نسبت به مرور افزایش یافته و از مقدار ۸۳٪ در نمونه Thick-1 به

¹ Yin

² Zhao



شکل ۶: (a) میزان محافظت EMI کل نمونه‌های Thick-1، Thick-2، و Thick-3.5 و (b) میزان محافظت EMI آن‌ها به تفکیک محافظت کل (SE_{tot})، بازتابی (SE_R) و جذبی (SE_A).

جدول ۳- خواص و عملکرد پارچه‌های پوشش داده شده با نیکل

مرجع	محافظت مخصوص ضخامتی (dB / میلی‌متر)	محافظت EMI کل (dB)	افزایش وزن (%)	ضخامت (میلی‌متر)	مواد افزودنی	بستر
[۲۵]	11.1	22.2	16.36 vol.%	2	مونومر پلی‌پروپیلن / اتیلن‌پروپیلن-دی‌ان / نیکل	الیاف شیشه
[۲۶]	-	38.0	67.7	-	نیکل-فسفر	پارچه پلی-استر
[۲۷]	24	48	70	2	الیاف بامبو / نیکل-آهن-فسفر	پلی‌لاکتیک اسید
[۱۲]	13.18	27.42	-	2.08	مگنتیت (Fe ₃ O ₄) / گرافن / اکسید احیا شده (rGO) / پلی‌آنیلین / نیکل-فسفر	بی‌بافت پلی-استر
[۲۸]	326.83	58.83	-	0.18	پلی‌دوپامین / روی اکسید - DOPO / پلی‌آنیلین / نیکل	پارچه پلی-استر
[۲۹]	30.17	72.40	-	2.40	الیاف کربن / نیکل / مکسین Ti ₃ C ₂ T _x	اپوکسی
[۳۰]	122.5	29.40	-	0.24	نیکل	بی‌بافت پلی-ایمید
[۸]	535.09	61	~29	0.11	نیکل / کبالت	پارچه شیشه E
[۳۱]	44.87	35.90	10	0.80	نیکل / کربن	پارچه پنبه‌ای
پژوهش حاضر	24.57	49.14	36.14	~2	نیکل-فسفر	بی‌بافت نایلون

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش نشان داد که استفاده از منسوجات بی‌بافت نایلون ۶ با لایه‌نشانی نیکل از طریق فرآیند آبکاری الکترولس، روش مؤثری برای محافظت در برابر تداخل

قرار گرفتن در معرض امواج الکترومغناطیسی می‌تواند به تجهیزات الکترونیکی و سلامت انسان آسیب برساند. این

جذب امواج الکترومغناطیسی است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که شرایط بهینه به‌صورت زیر است که به‌طور مستقیم بر کیفیت آبکاری تأثیرگذار بوده و منجر به افزایش میزان محافظت EMI شود. با بهینه‌سازی شرایط و تنظیم دقیق این عوامل می‌توان به سطح مطلوبی از میزان محافظت EMI دست یافت. به‌طور خاص با استفاده از غلظت نیکل سولفات برابر با 60 g/L ، میزان حفاظت EMI می‌تواند به $49/14 \text{ dB}$ افزایش یابد؛ به‌صورتی که این نمونه قادر به مسدود کردن $99/99\%$ امواج تابیده شده است. برای ادامه پژوهش، بررسی ترکیبات جدید، تأثیر دیگر عوامل و سطوح دیگری از عوامل مورد مطالعه در این پژوهش در فرآیند آبکاری الکترولس نیکل پیشنهاد می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Liu, S., Qin, S., Jiang, Y., Song, P., and Wang, H., "Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 145, p. 106376, 2021.
- [2] Verma, S., Dhangar, M., Paul, S., Chaturvedi, K., Khan, M. A., and Srivastava, A. K., "Recent advances for fabricating smart electromagnetic interference shielding textile: a comprehensive review", *Electronic Materials Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 331-344, 2022.
- [3] Mahmoodi, N., "Basic Dyes Removal from Aqueous Media by Nickel-Zinc Ferrite Magnetic Nanoparticles", *Journal of Textile Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 29-36, 2013.
- [4] Manogaran, R. and Murugesan, M., "A review on recent advancements in textile fabrics for electromagnetic interference (EMI) shielding

امواج الکترومغناطیسی (EMI) است. اما عوامل متعددی بر کیفیت آبکاری الکترولس تأثیر می‌گذارند. در این پژوهش تأثیر عوامل pH، غلظت نیکل سولفات، نسبت L:R، زمان فرآیند آبکاری و ضخامت بستر، هریک در سطح مختلفی مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مشاهده شد که موثرترین عوامل بر میزان محافظت EMI، غلظت نیکل سولفات و زمان لایه‌نشانی است؛ به نحوی که میزان محافظت EMI با افزایش زمان از $0/5$ به 15 دقیقه، بیش از 6 برابر افزایش یافته و از $6/69$ به $41/98 \text{ dB}$ می‌رسد. همچنین با افزایش غلظت نیکل سولفات از 60 به 70 g/L ، میزان محافظت EMI بیش از 5 برابر کاهش یافته و از $49/14$ به $8/79 \text{ dB}$ می‌رسد. در تمام نمونه‌های تهیه شده سازگار محافظت EMI بر اساس "materials", *Materials Today Communications*, p. 111879, 2025.

[5] Moradi, H., Nasouri, K., and Askari, G., "Effect of morphology and microstructure of NiCo nanoparticles on the electromagnetic shielding behavior of flexible and durable NiCo-coated carbon fibers", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 35, no. 1, p. 89, 2024.

[6] Beilis, I., Shnaiderman, A., and Boxman, R., "Chromium and titanium film deposition using a hot refractory anode vacuum arc plasma source", *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, no. 5-7, pp. 501-504, 2008.

[7] Wang, Q., Xiao, S., Shi, S. Q., Xu, S., and Cai, L., "Self-bonded natural fiber product with high hydrophobic and EMI shielding performance via magnetron sputtering Cu film", *Applied Surface Science*, vol. 475, pp. 947-952, 2019.

[8] Deng, Y., Huang, J., and Ning, X., "Electroless Nickel, Cobalt, and Cobalt/Nickel Coatings on E-

- Glass Fabrics: Towards High-Performance Electromagnetic Interference Shielding Materials", *Journal of Alloys and Compounds*, p. 181659, 2025.
- [9] Zhu, L., Zhao, H., Lan, B., Hou, L., Bi, S., Xu, Y., and Lu, Y., "Bio-inspired Fabrication of Cu-Ni Coatings onto Mercerized Flax Fabric by Electroless Plating", *Fibers and Polymers*, vol. 21, pp. 324-333, 2020.
- [10] Khajeh, E., Nasouri, K., Askari, G., and Mandegari, M., "Flexible and lightweight metalized polyamide nonwoven for electromagnetic interference shielding, electrothermal, photothermal, and antibacterial applications", *Chemical Engineering Journal*, p. 158203, 2024.
- [11] Gharagozloo Bahrami, A., Khajavi, R., and Maleknia, L., "Fabrication of Core-Shell Polyamide/Silver Nanofibers Composites", *Journal of Textile Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 17-22, 2013.
- [12] Sedighi, A., Naderi, M., and Brycki, B., "Wearable nonwoven fabric decorated with Fe₃O₄/rGO/PANI/Ni-P for efficient electromagnetic interference shielding", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 938, p. 168454, 2023.
- [13] Ding, X., Wang, Y., Xu, R., Qi, Q., Wang, W., and Yu, D., "Layered cotton/rGO/NiWP fabric prepared by electroless plating for excellent electromagnetic shielding performance", *Cellulose*, vol. 26, pp. 8209-8223, 2019.
- [14] Hareesh, M., Joseph, P., and George, S., "Electromagnetic interference shielding: A comprehensive review of materials, mechanisms, and applications", *Nanoscale Advances*, 2025.
- [15] Zheng, Q., Wang, J., Yu, M., Cao, W.-Q., Zhai, H., and Cao, M.-S., "Heterodimensional structure porous nanofibers embedded confining magnetic nanocrystals for electromagnetic functional material and device", *Carbon*, vol. 210, p. 118049, 2023.
- [16] Nair, A. M., Zachariah, S. M., and Thomas, S., "A Mini-Review On MXene Based Textiles For Electromagnetic Interference Shielding Application", *Qeios*, 2022.
- [17] Wang, X.-X., Zheng, Q., Zheng, Y.-J., and Cao, M.-S., "Green EMI shielding: Dielectric/magnetic "genes" and design philosophy", *Carbon*, vol. 206, pp. 124-141, 2023.
- [18] Mandegari, M., Nasouri, K., Ghasemi-Mobarakeh, L., and Jalali, S. a. H., "One stone for four birds: multifunctional MXene-coated PET fabric with favorable photothermal, antibacterial, flame retardant, and EMI shielding properties", *Materials Today Sustainability*, p. 100880, 2024.
- [19] Taheri-Ardebili, A., "Evaluation of electroless nickel-phosphorus (EN) coatings," University of Saskatchewan, 2002.
- [20] Miao, N., Jiang, J., and Wu, W., "Influences of Bath Chemistry and Plating Variables on Characteristics of Electroless Ni-P Films on Si Wafers from Alkaline Citrate Solutions", *Journal of Nanomaterials*, vol. 2018, no. 1, p. 1817542, 2018.
- [21] Lai, D., Chen, Z., Han, Z., Wu, Z.-S., and Chen, X., "Progress and roadmap for graphene films in electromagnetic interference shielding", *Resources Chemicals and Materials*, vol. 2, no. 1, pp. 11-38, 2023/03/01/ 2023.
- [22] Yin, G., Wang, Y., Wang, W., Qu, Z., and Yu, D., "A flexible electromagnetic interference shielding fabric prepared by construction of PANI/MXene conductive network via layer-by-layer assembly", *Advanced Materials Interfaces*, vol. 8, no. 6, p. 2001893, 2021.
- [23] Zhao, B. and Park, C. B., "Tunable electromagnetic shielding properties of conductive poly (vinylidene fluoride)/Ni chain composite films with negative permittivity", *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 5, no. 28, pp. 6954-6961, 2017.

- [24] Xiong, J., Zheng, H., Ding, R., Li, P., Liu, Z., Zhao, X., Xue, F., Chen, Z., Yan, Q., and Peng, Q., "Multifunctional non-woven fabrics based on interfused MXene fibers", *Materials & Design*, vol. 223, p. 111207, 2022.
- [25] Duan, H., Zhao, M., Yang, Y., Zhao, G., and Liu, Y., "Flexible and conductive PP/EPDM/Ni coated glass fiber composite for efficient electromagnetic interference shielding", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 10329-10336, 2018.
- [26] Moazzenchi, B. and Montazer, M., "Click electroless plating of nickel nanoparticles on polyester fabric: Electrical conductivity, magnetic and EMI shielding properties", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 571, pp. 110-124, 2019.
- [27] Zhang, Q., Wang, K., Chen, X., Tang, X., Zhao, Q., and Fu, Q., "Biomass composite based on metallized bamboo fiber for electromagnetic interference shielding, joule heating, and solar heating", *Composites Science and Technology*, vol. 243, p. 110228, 2023.
- [28] Guo, Q., Pan, Y., Hu, S., Zhang, Q., Dai, M., Qiu, F., and Huang, J., "Two birds with one stone: A "needle-like" structure constructed on multifunctional PET fabric surface for flame retardancy and electromagnetic interference shielding", *Chemical Engineering Journal*, vol. 490, p. 151656, 2024.
- [29] Hu, Y., Yang, G., Chen, J., Li, Y., Dong, M., Zhang, H., Bilotti, E., Jiang, J., and Papageorgiou, D. G., "Interfacial engineering of hybrid MXene-Ni-CF tri-core-shell composites for electromagnetic interference shielding and E-heating applications", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 178, p. 107990, 2024.
- [30] Tang, X., Zhao, X., Lu, Y., Li, S., Zhang, Z., Zhu, M., Yao, K., Zheng, J., Chen, H., and Duan, Y., "Flexible metallized polyimide nonwoven fabrics for efficient electromagnetic interference shielding", *Chemical Engineering Journal*, vol. 480, p. 148000, 2024.
- [31] Qiu, Q., Guo, Y., Sun, Q., and Lu, Y., "Studies on preparation and reversed electromagnetic interference shielding behavior from GHz to THz of multifunctional wearable Ni/CP composite", *Chemical Engineering Journal*, vol. 503, p. 158224, 2025.