

## بررسی عوامل موثر بر اثربخشی حفاظ الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی در باند فرکانسی X (۱۲/۵ GHz - ۸)

ویدا زراوشانی<sup>۱</sup> - علی خوانین<sup>۲\*</sup> - احمد جنیدی جعفری<sup>۳</sup> - سید باقر مرتضوی<sup>۴</sup> - فرحناز خواجه نصیری<sup>۵</sup>

khavanin@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۸

### مکیده

**مقدمه:** با توجه به اهمیت کنترل‌های مهندسی در پیش‌گیری از مواجهه با پرتوهای مایکروویو، این مطالعه به منظور طراحی و ساخت نوع جدیدی از حفاظ‌های الکترومغناطیسی کامپوزیتی در باند بسامدی ایکس و بررسی عوامل موثر بر اثربخشی آن انجام شد.

**روش کار:** در این تحقیق از رزین اپوکسی به عنوان بستر و نانوذرات اکسید نیکل به عنوان فیلر و در چهار درصد وزنی (۵، ۷، ۹ و ۱۱) برای ساخت حفاظ‌های کامپوزیتی با سه ضخامت گوناگون (۲، ۴ و ۶ میلی‌متر) استفاده شد. مشخصه یابی حفاظ‌ها با استفاده از دستگاه‌های پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدانی انجام و مقادیر اثربخشی حفاظتی، عمق نفوذ و آستانه نفوذ حفاظ‌ها با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر شبکه اندازه‌گیری شد. با استفاده از آنالیز وزن سنجی دمایی نیز اثر افزایش دما بر تغییرات جرمی حفاظ‌ها بررسی گردید.

**یافته‌ها:** حفاظ کامپوزیتی ۶-۱۱٪، بیش‌ترین مقدار اثربخشی حفاظتی (۸۴/۱۸ درصد) را در فرکانس ۸/۰۱ گیگاهرتز و حفاظ ۴-۷٪، بیش‌ترین مقدار میانگین اثربخشی حفاظتی (۶۶/۷۲ درصد) را در باند بسامدی ایکس، به‌دست آورد. ضخامت ۴ میلی‌متر ضخامت بهینه و بحرانی در این مطالعه بود و مقدار عمق نفوذ بیش‌تر از ضخامت کامپوزیت‌ها به‌دست آمد. افزایش مقدار نانوذرات اثر قابل توجهی بر اثربخشی حفاظتی حفاظ‌ها نداشت. حفاظ‌های مورد مطالعه تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاوم به حرارت بودند و دچار افت وزن نشدند. نانوذرات اکسید نیکل از توزیع و پراشیدگی مطلوبی در بستر اپوکسی برخوردار بودند و آستانه نفوذ در مقادیر اندک نانوذرات اکسید نیکل ظهور نمود.

**نتیجه‌گیری:** این مطالعه توانست با به‌کارگیری ضخامت کم و مقدار اندک نانوذرات به حفاظی با اثربخشی چشم‌گیر جهت اهداف بهداشت حرفه‌ای دست یابد، ضمن این‌که از مزایایی چون تولید آسان و ارزان، مقاومت در برابر رطوبت و خوردگی و سبک بودن نیز برخوردار باشد. کامپوزیت‌های اکسید نیکل / اپوکسی می‌توانند معرف نسل جدیدی از حفاظ‌های الکترومغناطیسی و گزینه مناسبی جهت حفاظت شغلی در برابر پرتوهای مایکروویو باشند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، با کاهش عمق نفوذ اثربخشی این حفاظ‌ها بهبود یافته و کارایی آنها در محیط‌های کاری نیز بررسی گردد.

### کلمات کلیدی: حفاظ کامپوزیتی، اکسید نیکل، الکترومغناطیس، مایکروویو، حفاظت شغلی

- ۱- استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران
- ۲- دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۳- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
- ۴- استاد گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
- ۵- استادیار گروه پزشکی اجتماعی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

### مقدمه

باند فرکانسی X دسته‌ای از پرتوهای میکرووی امواج الکترو مغناطیس با بازه بسامدی ۵/۱۲ - ۸ گیگاهرتز هستند (۱) که در ارتباطات ماهواره ای، راداری، شبکه‌های و اینترنتی، فضایی، رادیویی، کنترل ترافیک هوایی، ارتباطات ناوبری دریایی و ایستگاه‌های هواشناسی کاربردهای فراوانی دارند (۲) و کارکنان بسیاری را تحت مواجهه قرار میدهد. عدم کنترل مواجهه با این امواج می‌تواند منجر به بروز اثرات زیان‌بار حرارتی و غیر حرارتی بر سلامت شاغلین در معرض تماس شود (۳، ۴) در تحقیقات گذشته افزایش معنی دار ابتلا به سرطان خون غیر لیمفوسیتیک و نیز افزایش اندک مقدار مرگ و میر در سربازان با مواجهه با این امواج گزارش گردیده است (۳). هم‌چنین باند بسامدی X دارای اثرات زیان‌بار دیگری از جمله کاهش چگالی اسپرم، کاهش باروری مردان، آسیب به DNA اسپرم مردان تحت مواجهه با امواج رادار (۵)، سرطان مغز (۶)، آب مروارید (۷) و تحریک رشد سلول‌های سرطانی (۸) است که لزوم توجه به سلامت شاغلین تحت مواجهه با این امواج را نشان می‌دهند. کنترل‌های مهندسی بهترین رویکرد ایمنی برای حفاظت در برابر پرتوهای رادیویی و میکروویو هستند و استفاده از حفاظ می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌ای مواجهه شغلی با این پرتوها را کاهش دهد. مطالعات قبلی، عدم دانش کافی در خصوص شیوه‌های حفاظ گذاری و نیز فقدان پایش سلامتی کارکنان را گزارش داده اند (۹).

در گذشته برای حفاظت افراد و تجهیزات الکترونیکی در برابر پرتوهای رادیویی و میکروویو، عمدتاً از حفاظ‌های فلزی استفاده می‌شد که معایب مختلفی مانند وزن سنگین، قیمت بالا، عدم پایداری در برابر خوردگی و فرآیند پذیری سخت داشتند (۱۰). امروزه استفاده از پلیمرها از جمله رزین اپوکسی

به دلیل نداشتن معایب فوق و دارا بودن مزایایی چون پایداری در برابر رطوبت و مواد شیمیایی (۱۲) فرآیند پذیری مطلوب، سبک بودن، ارزان بودن، مقاومت در برابر خوردگی، چند منظوره بودن و عمل آوری آسان (۱۱، ۱۳)، آن را به عنوان گزینه مناسب در ساخت سپرهای الکترومغناطیس مطرح نموده است، ضمن این‌که وجود کارایی مکانیکی بالا در این پلیمر ویژگی مطلوب دیگری است که آن را مانند فلزات در برابر ضربات مکانیکی مقاوم می‌سازد (۱۲).

اکسیدنیکل در حالت بالکی سوپر پارامغناطیس و جزء نیمه رسانا نوع P می‌باشد که دارای گاف انرژی بالایی است (۴-۳/۴ الکترون ولت) (۱۴) و می‌تواند به عنوان دریافت کننده الکترون عمل کند. از این‌رو امروزه، به سبب خواص الکترومغناطیسی خود، پژوهش‌های علمی فراوانی را در زمینه‌های مختلفی مانند ساخت میکروباتری، استفاده به عنوان خازن به همراه نانولوله‌های کربنی و... به خود جلب نموده است (۱۵).

بنابراین با توجه به خلاءهای موجود در بهداشت حرفه‌ای، در این مطالعه سعی شد تا برای نخستین بار از نانو ذرات اکسیدنیکل و رزین اپوکسی اکسید نیکل در ساخت حفاظ الکترومغناطیس کامپوزیتی جدیدی جهت کنترل امواج میکروویو باند X با محدوددهی بسامدی ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز استفاده گردد و نیز برخی از عوامل موثر بر اثربخشی حفاظتی آن بررسی شود.

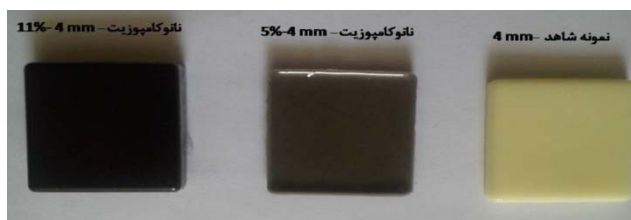
### روش کار

#### ساخت حفاظ‌های الکترومغناطیس

در این تحقیق از رزین اپوکسی با نام تجاری EI-403 و عامل پخت پلی‌آمیدو آمین ایمادازولین<sup>۱</sup> با نام تجاری HA-14 به عنوان بستر (Matrix)<sup>۲</sup> و نانو ذرات

1 - Polyamido Amine Immadazolin

۲ - در مواد کامپوزیتی، ماده‌ی اصلی که بخش اعظم ماده کامپوزیتی را تشکیل می‌دهد، بستر یا ماتریس می‌گویند.



شکل ۱. سه نمونه از حفاظ‌های تک لایه‌ی ساخته شده

فنی رزین اپوکسی مورد استفاده، قالب‌ها در سطحی صاف و تراز و در دمای اتاق ( $25^{\circ}$ – $31^{\circ}$ ) قرار داده شدند تا عملیات پخت تکمیل شود. نمونه‌های ساخته شده پس از هفت روز به استحکام کامل رسیده و از قالب خارج شدند.

#### نامگذاری حفاظ‌ها

برای نامگذاری حفاظ‌ها از دو مشخصه درصد وزنی نانوذرات اکسید نیکل و ضخامت استفاده شد. برای مثال حفاظی که حاوی ۵ درصد وزنی از نانوذرات و ضخامت ۴ میلی‌متر بود به اسم «حفاظ ۴ mm-۵%» نام‌گذاری گردید. شکل ۱ تصاویری از حفاظ‌های ساخته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

#### مشخصه یابی حفاظ‌ها

با استفاده از دستگاه‌های پراش اشعه ایکس ( $XRD^2$ ) و میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدانی ( $FESEM^3$ ) نانوذرات مورد استفاده مشخصه یابی شدند. شناسایی ترکیب اکسید نیکل با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل X Pert MPD ساخت شرکت فیلیپس هلند انجام شد. به منظور بررسی مورفولوژی و چگونگی توزیع و پراشیدگی نانوذرات، از میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار

اکسید نیکل (شرکت Us Research Nanomaterial آمریکا) با محدودهی اندازه ۳۵–۱۵ نانومتر به شکل تقریباً کروی و با خلوص ۹۹/۵% به عنوان ماده‌ی پرکننده (filler) استفاده شد. نانو ذرات اکسید نیکل به شکل کروی و با خلوص ۹۹% از شرکت Us-Research Nanomaterial تهیه شدند. برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها، نانو ذرات اکسید نیکل در مقادیر ۵، ۷، ۹ و ۱۱ درصد وزنی انتخاب و با کلروفرم (شرکت مرک، آلمان) به مقدار ۰/۱ حجم نمونه با یک‌دیگر ترکیب و مخلوط حاضر به مدت ۱۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک (مدل SONICA، ایتالیا) قرار داده شدند. سپس از یک عامل سیلانی با عنوان آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان<sup>۱</sup> (به مقدار ۰/۱ وزن اکسید نیکل) به عنوان جفت کننده استفاده شد. در مرحله بعد رزین اپوکسی به مخلوط فوق اضافه و با استفاده از هم‌زن مکانیکی (مدل RW 20 DIGITAL، شرکت IKA، ساخت کشور چین) به مدت ۳ دقیقه با میزان ۷۰۰ دور در دقیقه با یک‌دیگر ترکیب شدند. سپس عامل پخت رزین (HA-14) اضافه و مخلوط مورد نظر مجدداً به مدت ۳ دقیقه با میزان ۷۰۰ دور در دقیقه در هم‌زن مکانیکی ترکیب شد. پس از آن به مدت ۸ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار داده و در نهایت مواد مورد نظر درون قالب‌های سیلیکونی ریخته شد. نمونه‌ها به منظور حباب‌گیری در آن خلاء (مدل DZF6024، چین) قرار داده شدند (۱۶). سپس بر اساس دستورالعمل ارائه شده در کاربرگ

2-X- Ray Diffraction

3- Field Emission scanning electron microscope

1 - 3-Aminopropyl Triethoxy-Silane (APTES)

میدانی استفاده و آستانه نفوذ<sup>1</sup> نیز اندازه گیری شد. برای تهیه تصاویر FESEM لایه نشانی طلا، روی نمونه‌ها انجام گردید و از میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدانی مدل HITACHI S-4160 جهت تهیه تصاویر از سطح مقطع نمونه‌ها استفاده شد.

#### اندازه گیری اثربخشی حفاظتی

با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه Agilent 8510C<sup>2</sup> که بر اساس روش انعکاس و عبور<sup>3</sup> و اندازه گیری پارامترهای پراشیدگی عمل می کند (۱۷-۱۹) میزان اثربخشی حفاظتی حفاظهای مورد نظر در باند فرکانسی X اندازه گیری شدند (۲۰). حفاظهای ساخته شده در ابعاد  $0.9 \times 0.4$  اینچ (مطابق ابعاد موجبر) برش داده شدند و به تفکیک در میان دو موجبر استاندارد مدل WR-90 قرار گرفتند. با عبور امواج مایکروویو مورد نظر از میان حفاظ موجود در دو موجبر، پارامترهای پراشیدگی مربوط به مقدار انرژی انعکاسی و عبوری موج که به ترتیب  $S_{11}$  و  $S_{21}$  نامیده می‌شوند، در بازهی بسامدی ۸-۱۲/۵ گیگاهرتز<sup>4</sup> اندازه گیری شدند. سپس با استفاده از معادلات ۱ و ۲ مقدار اثربخشی حفاظتی کل، برای هر یک از حفاظهای ساخته شده به دست آمد (۱۶).

$$T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad (1)$$

$$SE(\text{dB}) = -10 * \log_{10}|1 - T| \quad (2)$$

پارامترهای معادلات فوق به شرح زیر می‌باشد:

$S_{12}$  و  $S_{21}$ : پارامترهای پراشیدگی مربوط به مقدار انرژی عبوری موج

T: توان موج عبوری

1- Percolation Threshold

2 - Network Analyzer Vector (V.N.A)

3- Transmission / Reflection coaxial line method

۴ - در محدوده مورد نظر، میزان اثربخشی حفاظتی در فواصل ۶۲۵/۵ مگاهرتزی و در مجموع در ۸۰۱ بسامد، اندازه گیری شد.

SE: مقدار اثربخشی حفاظتی  
سپس با استفاده از معادله ذیل درصد کاهشدهی حفاظها به صورت SE% محاسبه شد (۲۱):

$$SE(+\text{dB}) = 10 \log \frac{P_i}{P_t} \rightarrow SE_{\%} \\ = \left( 1 - \left( \frac{1}{10^{SE/10}} \right) \right) \times 100 \quad (3)$$

#### اندازه گیری عمق نفوذ

برای اندازه گیری بیشترین مقدار عمق نفوذ، ضرایب دی الکتریک و نفوذ پذیری مغناطیسی حفاظ حاوی ۵% وزنی اکسید نیکل با ضخامت ۲ میلی متر در فرکانس ۸ گیگاهرتز، با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه (مدل 8510C، شرکت Agilent، آمریکا) موجود در آزمایشگاه مایکروویو پژوهش کده نصر به صورت مستقیم اندازه گیری شد. در نهایت با استفاده از معادلات ۴ و ۵ مقادیر ضریب جذب ( $\alpha$ ) و عمق نفوذ محاسبه گردید (۲۲).

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[ \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{1/2} \quad (4)$$

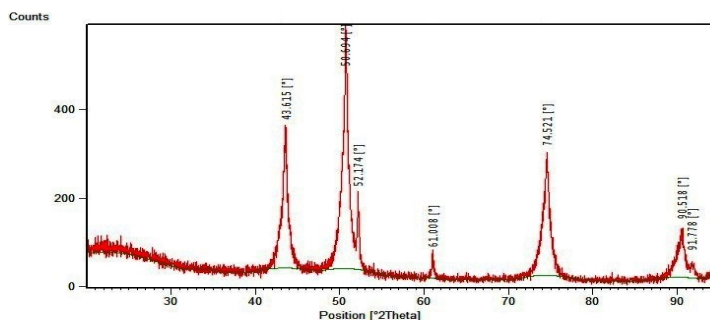
$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (5)$$

که در این جا:

$\alpha$ : ضریب جذب،  $\mu$ : نفوذپذیری مغناطیسی (هنری بر متر)،  $\epsilon$ : ثابت دی الکتریک (فاراد بر متر)،  $\sigma$ : رسانایی الکتریکی (زیمنس بر متر)،  $\omega$ : سرعت زاویه‌ای، F: فرکانس (هرتز) و  $\epsilon_0$ : ثابت دی الکتریک فضای آزاد که برابر با  $10^{-12} \times 8.854$  (فاراد بر متر) است.

#### اندازه گیری آستانه نفوذ

با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه فوق، مقادیر موهومی گذردهی الکتریکی ( $\epsilon''$ ) برای حفاظهای ۲ میلی‌متری اندازه گیری و سپس با استفاده از معادله (۶) مقادیر رسانایی الکتریکی برای



نمودار ۱. طیف XRD از نمونه حفاظ ساخته شده (حاوی نانوذرات اکسید نیکل)

### یافته ها

مشخصه یابی حفاظ با استفاده از تفریق اشعه ایکس طیف XRD به دست آمده با کارت استاندارد شماره ۴۷-۱۰۴۹ مربوط به ترکیب بانسیت یا اکسید نیکل با فرمول [NiO] مطابقت داشت. نانوکریستال های اکسید نیکل توسط پیک های XRD در زوایای ۴۳/۰۶۹۴، ۵۰/۰۶۹۴، ۷۴/۰۵۲۱ و ۸۳/۰۵۱۸° در ۹۰٪ شناسایی شدند.

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدانی بررسی کیفی (مشاهده ای) تصاویر به دست آمده از سطح مقطع حفاظ های تک لایه ی مورد نظر نشان داد نانوذرات مورد نظر، از توزیع<sup>۴</sup> یکنواخت و پراشیدگی<sup>۵</sup> مطلوب برخوردار شده اند (شکل های ۲ و ۳).

### عمق نفوذ

با استفاده از معادلات شماره ۴ و ۵، عمق نفوذ برای حفاظ ۲-۵ mm محاسبه و مقدار آن ۱۷/۴۳ سانتی متر به دست آمد.

### آستانه نفوذ

نمودار ۲ تغییرات مقدار رسانایی الکتریکی حفاظ های دو میلی متری را که حاوی مقادیر ۵، ۷،

این سپرها محاسبه گردید (۲۳). با توجه به تعریف آستانه نفوذ<sup>۱</sup>، درصد وزنی از نانو ذرات اکسید نیکل که در آن، مقدار متوسط رسانایی سپر به صورت قابل توجهی افزایش یافت به عنوان آستانه نفوذ در نظر گرفته شد (۲۴).

$$\sigma = \epsilon'' \omega \epsilon_0 \quad (۶)$$

### وزن سنجی دمایی<sup>۲</sup>

به منظور تهیه اطلاعات مستقیمی در مورد پایداری حرارتی و رفتار از هم پاشیدگی حفاظها (با استفاده از افت وزنی<sup>۳</sup>) در برابر حرارت، از آنالیز وزن سنجی حرارتی استفاده شد (۲۵) تا بتواند حدود مقاومت حرارتی آن را در برابر دمای هوای محیط کار نشان دهند. در این آزمون، مقدار کاهش جرم نمونه در اثر افزایش دما بررسی گردید. بدین منظور حفاظ تک لایه ۶-۱۱ mm در مرکز تحقیقات صنایع لاستیک ایران با استفاده از دستگاه STA-1500 (TGA/DSC) و بر اساس استاندارد ASTM E1131 مورد آزمون قرار گرفت. نمونه ها در اتمسفر هوا، با میزان گرمادهی ۲۰ درجه سانتی گراد در دقیقه و تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفتند.

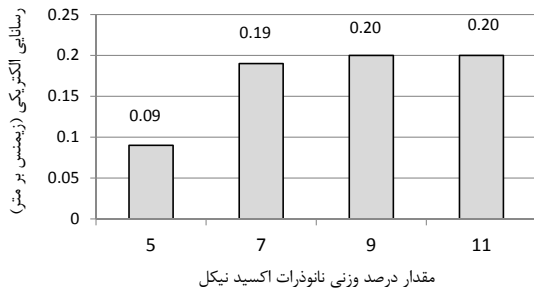
۱- آستانه نفوذ جایی است که مقدار مقاومت الکتریکی به مقدار معنی داری کاهش می یابد و رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت به صورت چشمگیری افزایش می یابد.

2-Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

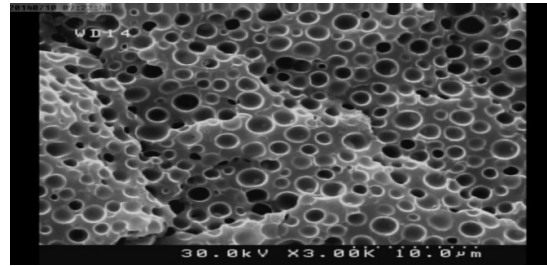
3- Degradation behavior of samples

4- Distribution

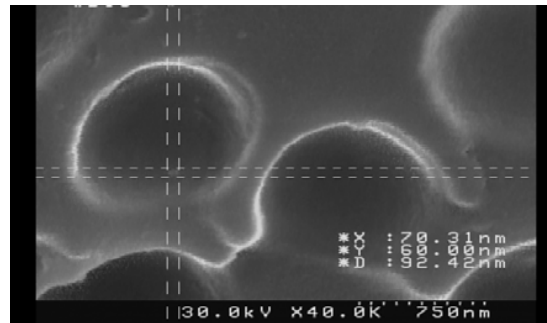
5- Dispersion



نمودار ۲. تاثیر تغییرات درصد وزنی نانوذرات اکسید نیکل بر رسانایی الکتریکی سپرهای تک لایه دو میلی متری



شکل ۲. تصویر FESEM حاصل از حفاظ ۶ mm-۱۱%



شکل ۳. نمونه‌ای از اندازه نانوذرات اکسید نیکل در بستر زین

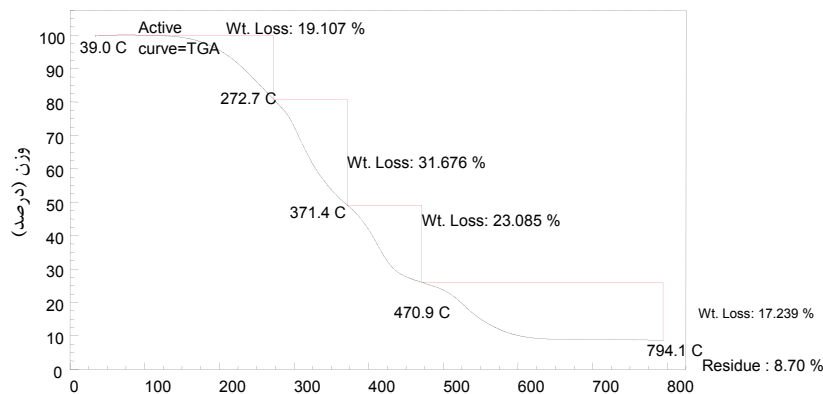
اپوکسی در حفاظ ۶ mm-۱۱%

باقی‌ماند. با توجه به این‌که در آستانه نفوذ، خواص الکتریکی ماده دچار تغییر محسوس می‌شود، بنابراین در مطالعه حاضر، آستانه نفوذ بین ترکیب ۵ و ۷ درصد وزنی از نانوذرات اکسید نیکل، بروز کرده است.

#### آنالیز وزن سنجی دمایی

بر اساس نمودار ۳، آفت وزن نمونه تقریباً در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده است. نتایج این نمودار نشان داد ۱۹/۱۰۷ درصد از وزن اولیه نمونه در گسترهی دمایی ۲۷۲/۷، ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش یافته است. بیش‌ترین مقدار کاهش وزن نمونه (۳۱/۶۷۶ درصد) در بازهی دمایی ۳۷۱/۴ - ۲۷۲/۷ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاده است. در مجموع در گسترهی دمایی ۱۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار ۹۱/۱۰۴۷ درصد از وزن نمونه کاسته شده

۹ و ۱۱ درصد وزنی از نانوذرات اکسید نیکل بودند، نشان می‌دهد. برای ترکیب حاوی ۵ درصد وزنی، مقدار متوسط رسانایی الکتریکی برابر با ۰/۰۹ و برای ترکیب حاوی ۷ درصد وزنی مقدار متوسط رسانایی الکتریکی به ۰/۱۹ زیمنس بر متر رسید و برای ترکیب‌های درصد وزنی ۹ و ۱۱ درصد مقدار متوسط رسانایی الکتریکی در حدود ۰/۲ زیمنس بر متر ثابت



نمودار ۳. آنالیز وزن سنجی دمایی حفاظ تک لایه (حفاظ ۶ mm-۱۱%)



تغییرات کاهش وزن نمونه در بازه‌ی دمایی ۸۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً یکنواخت بوده است. تغییرات ضخامت، با یک‌دیگر مقایسه می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد در هر یک از درصدهای وزنی، با افزایش ضخامت از ۲ به ۴ میلی‌متر، میانگین مقادیر اثربخشی حفاظتی به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد اما این نتیجه برای ضخامت ۶ میلی‌متر تکرار نمی‌شود. میانگین مقادیر اثربخشی حفاظتی در ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر تفاوت چشم‌گیری با یک‌دیگر ندارند.

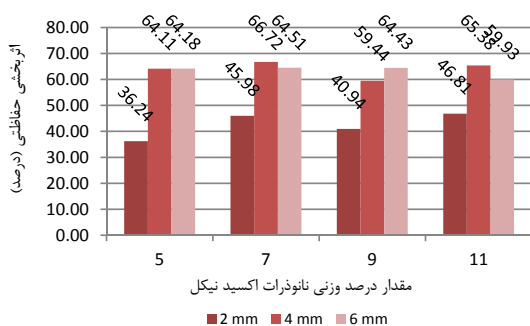
### بحث و نتیجه‌گیری

در گذشته مطالعات مختلفی انجام شده که در آن با استفاده از رزین و ترکیبات مختلف نیکل مانند فلز نیکل، فریت‌های نیکل یا آلیاژهای نیکل در ساخت حفاظ‌های الکترومغناطیسی تک لایه استفاده شده است. در این تحقیق برای نخستین بار از ترکیب اپوکسی و اکسید نیکل برای ساخت حفاظ‌ها بهره گرفته شده که دارای خواص الکترومغناطیسی متفاوتی نسبت به نیکل و سایر ترکیبات آن است. از این‌رو، این مطالعه حفاظ الکترومغناطیسی جدیدی را جهت کنترل پرتوهای میکروویو باند X ارائه می‌نماید. مشخصه یابی حفاظ‌های مورد مطالعه نشان داد نانوذرات مورد نظر دارای توزیع یکنواخت و پراشیدگی مطلوب بودند (

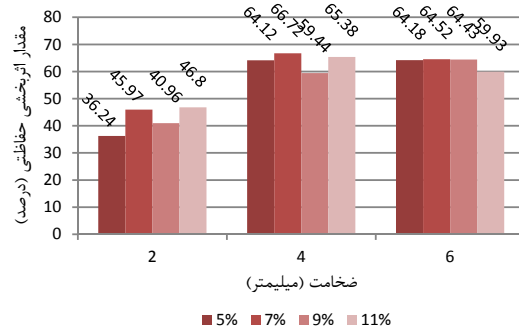
است. تغییرات کاهش وزن نمونه در بازه‌ی دمایی ۸۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً یکنواخت بوده است.

### اثربخشی حفاظتی

بر اساس نتایج به‌دست آمده، کم‌ترین مقدار میانگین اثربخشی حفاظتی ۳۶/۲۴ درصد و بیش‌ترین آن ۶۶/۷۲ درصد بود که به ترتیب مربوط به حفاظ‌های ۲ mm -۵% و ۴ mm -۷% می‌باشد (نمودارهای (۲) و (۱)). علاوه بر این، بیش‌ترین مقدار اثربخشی حفاظتی در باند فرکانسی ایکس توسط حفاظ ۶ mm -۱۱% به‌دست آمد که توانست مقدار ۸۴/۱۸ درصد از انرژی اولیه امواج میکروویو باند ایکس را در فرکانس ۸/۰۱ گیگاهرتز کاهش دهد. نمودار ۴، اثربخشی حفاظتی حفاظ‌های مورد مطالعه را در ضخامت‌های مختلف و بر اساس تغییرات درصد وزنی نانوذرات اکسید نیکل با یک‌دیگر نشان می‌دهد. بر این اساس، مقادیر اثربخشی حفاظتی در ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر، بیش‌تر از ضخامت ۲ میلی‌متر است اما مقادیر اثربخشی حفاظتی در دو ضخامت نامبرده، نسبت به یک‌دیگر تفاوت چشم‌گیری ندارند. نمودار ۵ اثربخشی حفاظتی حفاظ‌های تک لایه را در هر یک از درصدهای وزنی و بر اساس



نمودار ۵. تاثیر ضخامت بر میانگین اثربخشی حفاظتی حفاظ‌ها در درصدهای وزنی مورد مطالعه



نمودار ۴. تاثیر درصد وزنی نانوذرات اکسید نیکل بر میانگین اثربخشی حفاظتی حفاظ‌ها در ضخامت‌های مورد مطالعه

و انعکاس‌های متوالی به‌دست می‌آید. افت انعکاس تابع نسبت  $\mu_p/\sigma$  و افت جذب تابع  $\mu_p\sigma$  می‌باشد که در این جا  $\sigma$  رسانایی الکتریکی حفاظ نسبت به مس و  $\mu_p$  نفوذپذیری مغناطیسی حفاظ نسبت به فضای آزاد است (۳۰). بنابراین با بهبود پراشیدگی می‌توان خواص الکترومغناطیسی از جمله رسانایی و نفوذپذیری مغناطیسی را تقویت نمود و ضریب تلفات مغناطیسی و الکتریکی حفاظ و در نهایت مقدار جذب یا انعکاس پرتو را افزایش داد. خواص الکتریکی یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار بر اثربخشی حفاظتی سپرها هستند (۳۱).

آنالیز وزن سنجی حرارتی در این مطالعه، اطلاعات مستقیمی در مورد پایداری حرارتی سپر مورد بررسی و نیز رفتار از هم پاشیدگی آن (با استفاده از افت وزنی) را تهیه نمود (۲۵). نتایج مربوطه نشان داد سپر مورد نظر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد دچار نقص کاهش وزن در ساختار خود نشده است بنابراین پایداری حرارتی کافی را در برابر دمای هوای محیط کار خواهد داشت (نمودار ۳). مطالعات گذشته نیز پایداری حرارتی بسیار خوب اپوکسی و کامپوزیت‌های آن را نشان داده اند. از آنجایی پایداری حرارتی، به عوامل مختلفی مانند نوع رزین اپوکسی، نوع و مقدار فیلر مورد استفاده (۲۵) و نوع عامل پخت (۳۲) بستگی دارد بنابراین در پژوهش‌های مشابه پیشین، دماهای مختلفی به عنوان دمای آغازین تجزیه گزارش شده است. دمای آغازین افت وزن نمونه مورد بررسی در برخی از تحقیقات گذشته مانند مطالعه ممانی و همکاران (۳۳) و کومار و همکاران (۳۴) نزدیک به یافته‌های پژوهش حاضر بوده و به ترتیب ۱۴۷/۱ و بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

در مطالعه زکریان و همکاران دمای آغازین افت وزن برای نمونه‌های اپوکسی و دو نوع از کامپوزیت‌های

شکل شماره ۲) برای بررسی کیفی درجه پراشیدگی، اغلب از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی از جمله میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده می‌شود (۲۶). در این مطالعه نیز از (FESEM) استفاده شد. بر این اساس هرچه اندازه ذرات مجزای مشاهده شده در تصاویر به‌دست آمده، کوچک‌تر و به سبب نانوذرات مورد استفاده نزدیک‌تر باشد، بهتر است. با توجه به این‌که سایز ذرات مجزا در بستر اپوکسی کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر بود و نزدیک به سایز نانوذرات خریداری شده (۳۵-۱۵ نانومتر) برآورد شد، بنابراین پراشیدگی مطلوب به‌دست آمده است. از طرفی دست‌یابی به آستانه نفوذ<sup>۱</sup> در مقادیر کم‌تر نانوذرات، دلیل دیگری بر پراشیدگی بهتر نانوذرات در این مطالعه می‌باشد. (۲۴). در این مطالعه، آستانه نفوذ، بین ۵ و ۷ درصد وزنی از نانوذرات نیکل بروز نمود. آستانه نفوذ جایی است که مقدار مقاومت الکتریکی به مقدار معنی داری کاهش می‌یابد. در این حالت ذرات با یک‌دیگر تشکیل شبکه رسانایی می‌دهند (۴) و رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت چندین برابر افزایش می‌یابد. در پراشیدگی خوب، گذرگاه رسانایی در غلظت اندکی از ذرات، به سهولت شکل می‌گیرد (۲۴). از این‌رو، این یافته دلیل دیگری بر دست‌یابی به پراشیدگی مطلوب در این مطالعه می‌باشد.

بهبود پراشیدگی باعث افزایش تانژانت اتلاف کامپوزیت در کسر وزنی ثابت پرکننده می‌شود (۲۷). تانژانت تتا یا ضریب تلفات از نسبت بخش موهومی به بخش حقیقی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی به‌دست می‌آید (۲۸). هرچه این نسبت بیش‌تر باشد، آن ماده اتلاف بیش‌تری دارد (۲۹). براساس مکانیسم عمل‌کرد حفاظها، اثربخشی حفاظتی کل از مجموع افت ناشی از انعکاس، جذب

1 - percolation threshold



ساخته شده کم‌تر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد بود که از دمای آغازین به دست آمده در این مقاله پایین‌تر بود (۲۵). نمونه مورد بررسی در مطالعه حاضر، تقریباً در دمای ۲۲۵ درجه سانتیگراد دچار ۱۰ درصد افت وزنی شد (نمودار ۳)، در حالی که در مطالعات مشابه این افت وزنی در دماهای ۱۷۲/۳۳، ۱۸۵/۱۸ به دست آمده است (۲۵). از این رو پایداری حرارتی سپر مورد بررسی در این مقاله بیش‌تر از برخی موارد مشابه بود. یافته‌های این مطالعه نشان داد حفاظ‌های مورد نظر دارای پایداری حرارتی بالا می‌باشند که استفاده از آن‌ها را در شرایط دمایی بالا امکان‌پذیر می‌سازد. یافته‌های مطالعه حاضر نشان دادند حفاظ ۴-۷٪، بهترین حفاظ ساخته شده در این مطالعه بود. کم‌ترین، بیش‌ترین و میانگین مقادیر اثربخشی حفاظتی این حفاظ به ترتیب ۴۸/۹۵، ۸۰/۵۲ و ۶۶/۷۲ درصد بود. بنابراین این حفاظ توانست به طور میانگین ۶۶/۷۲ درصد از انرژی اولیه پرتوهای ورودی میکروویو مورد مطالعه را کاهش دهد. به عبارت دیگر این حفاظ می‌تواند در مواجهه با پرتوهای میکروویو مورد نظر با چگالی توان ۱۰ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع (مقدار مجاز مواجهه) (۱) مقدار آن را به ۳/۳ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع، کاهش دهد. با توجه این‌که حفاظ‌های مورد نظر با رویکرد بهداشت حرفه‌ای و برای حفاظت افراد در برابر پرتوهای میکروویو ساخته شده‌اند، بنابراین با توجه به اثربخشی حفاظتی قابل ملاحظه و چشم‌گیر این حفاظ می‌توان از آن به عنوان لایه‌ی کاهنده قوی جهت کاهش مواجهه شغلی افراد در برابر امواج میکروویو باند ایکس استفاده نمود. حفاظ‌های موجود در برابر پرتوهای میکروویو را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود: حفاظ‌های معماری، حفاظ‌های نصب شده بر روی تجهیزات و وسایل حفاظت فردی. حفاظ‌های معماری حفاظ‌هایی هستند که درون

دیوارها و یا ساخت اتاق‌ها به کار برده می‌شوند (۳۵). بنابراین از حفاظ ۴-۷٪ می‌توان به عنوان لایه کاهنده امواج میکروویو درون دیوارها، درهای دوجداره و ساختار اتاق‌ها استفاده نمود و از آن‌ها برای ساخت اماکن ایمن در برابر پرتوهای میکروویو باند ایکس بهره برد (۳۵). در این پژوهش، تاثیر افزایش ضخامت و درصد وزنی نانوذرات بر افزایش میانگین مقادیر اثربخشی حفاظتی با محدودیت همراه بود. افزایش ضخامت از ۲ به ۴ میلی‌متر، مقدار اثربخشی حفاظتی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. اما افزایش ضخامت از ۴ به ۶ میلی‌متر مفید نبود. به عبارت دیگر، تاثیر افزایش ضخامت بر رشد میانگین اثربخشی حفاظتی سپرها (در باند ایکس) با محدودیت همراه و ضخامت ۴ میلی‌متر ضخامت بهینه یا بحرانی در این مطالعه بود (نمودار ۵). در برخی از مطالعات پیشین، رابطه معکوس افزایش ضخامت و اثربخشی حفاظتی در تمام باند فرکانسی مورد نظر یا بخشی از آن گزارش شده است. کینگ و همکاران (۳۶) و زو و همکاران در مطالعه خود مشاهده نمودند اثربخشی حفاظتی با افزایش ضخامت رابطه عکس داشت، به گونه‌ای که با کاهش ضخامت، مقادیر اثربخشی حفاظتی افزایش یافتند (۳۷). همچنین تعدادی از مطالعات گذشته نشان دادند افزایش ضخامت تاثیر ناچیز یا محدودی بر اثربخشی حفاظتی داشته یا نتوانسته متناسب با افزایش خود، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر اثربخشی حفاظتی داشته باشد (۳۷، ۳۸). سانی و همکاران (۳۸) و کینگ و همکاران (۱۷) نشان دادند اثر ضخامت بر افزایش اثربخشی حفاظتی با محدودیت همراه بوده و الزاماً با افزایش ضخامت نمی‌توان به اثربخشی حفاظتی بیش‌تری دست یافت. در مطالعات مشابه در حوزه سازگاری / تداخلات الکترومغناطیسی، از ضخامت‌های مختلفی

رسانایی یک حفاظ می‌باشند (۴۷، ۴۸) و افزایش رسانایی حفاظ باعث افزایش اثربخشی حفاظتی آن خواهد شد (۲۴). بنابراین یکی از دلایل احتمالی این ناهمخوانی افزایش مدت زمان اختلاط نانوذرات در مطالعات پیشین است که توانسته افزایش مقدار فیلر را به عنوان متغیر تاثیر گذار بر اثربخشی حفاظتی مطرح سازد.

مقایسه یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های مشابه پیشین، اثربخشی چشم‌گیر این حفاظ در بهداشت حرفه‌ای را بیش تر نشان می‌دهد. در مطالعات برق و الکترونیک معمولاً، از نانوذرات پایه فلزی مانند نانوذرات فریتها (۳۸، ۴۹)، انواع اکسیدهای فلزی (۴۳، ۵۰)، کربونیل آهن (۱۷، ۳۶)، آلیاژ فلزات (۵۱، ۵۲) به عنوان فیلر یا پر کننده استفاده شده است که البته اغلب آنها در ترکیب با یک‌دیگر یا سایر نانوذرات کربنی مانند نانولوله‌های کربنی (۳۹، ۵۳)، گرافیت (۵۴، ۵۵)، گرافن (۳۶)، نانوالیاف کربنی (۵۶، ۵۷) و کربن بلک (۴۰، ۵۸) استفاده شده اند. نانو صفحه‌های گرافن، نانو لوله‌ها و نانو الیاف کربنی نسبت منظر<sup>۱</sup> بالا و رسانایی الکتریکی بسیار بالایی دارند (۱۱، ۲۴، ۲۶) و می‌توانند در مقادیر اندکی موجب افزایش چشم‌گیر اثربخشی حفاظتی شوند (۲۱).

در مطالعه حاضر صرفاً از نانوذرات اکسید نیکل و بدون ترکیب با سایر نانوذرات پایه فلز یا سایر نانوذرات کربنی استفاده شده بود. اکسید نیکل در حالت بالکی نیمه رسانا و پارامغناطیس می‌باشد (۱۵، ۵۹). اگر چه نانوذرات مورد استفاده در تحقیقات پیشین، از نظر خواص الکترومغناطیسی بر اکسید نیکل برتری دارند اما در نتایج پژوهش حاضر به حفاظتی دست یافتیم (حفاظ ۴-۷٪ با اثربخشی ۶۶/۷۲ درصد) که میانگین اثربخشی آن بیش از یک

مانند ضخامت ۳ میلی‌متر (۳۹) ۵/۲۱، ۵/۷۶، ۵/۸۸، ۶/۳۰، ۶/۵، ۶/۷۸، ۱۰/۸۱، ۵۳/۶، ۷/۶۰/۷، ۸/۳۴ و ۸/۹۴ میلی‌متر (۴۰) و ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ میلی‌متر (۳۸) برای ساخت حفاظ‌های الکترومغناطیس استفاده شده بود. مقایسه ضخامت‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر (۲، ۴ و ۶ میلی‌متر) با ضخامت‌های فوق نشان می‌دهد ضخامت‌های به کار رفته در این مطالعه نه تنها برای محیط‌های کاری بسیار مناسب بوده و محدودیتی ایجاد نمی‌نماید بلکه از برخی ضخامت‌های به کار رفته در تحقیقات فوق نیز کم تر می‌باشد.

تعدادی از تحقیقات مربوط به سازگاری الکترومغناطیس نشان دادند افزایش مقدار فیلر می‌تواند موجب افزایش میانگین / مقادیر اثربخشی حفاظتی در باند فرکانسی مورد نظر شود (۳۸، ۴۱-۴۴). اما نتایج حاصل از مطالعه حاضر، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین همخوانی نداشت. به نظر می‌رسد یکی از عوامل موثر بر این نتیجه، طولانی بودن مدت زمان اختلاط نانوذرات در حلال یا همگن سازی نانوذرات در بستر پلیمر در مطالعات پیشین باشد. در اغلب موارد، افزایش مقدار انرژی عملیات ترکیب و اختلاط نانوذرات (زمان اختلاط یا سرعت اختلاط) می‌تواند به پراشیدگی بهتر نانوذرات بیانجامد (۲۶). امروزه ایجاد پراشیدگی مطلوب، یک موضوع مهم و البته چالش‌انگیز در بین محققین است که نقش اصلی در دستیابی به حفاظ‌های قوی تر را بازی می‌کند (۴۵). خواص مغناطیسی و الکتریکی، اندازه، مرفولوژی و ساختار مواد از عوامل موثر بر جذب امواج الکترومغناطیس است و مرفولوژی از عامل پراشیدگی متاثر می‌شود. بنابراین با تغییر پراشیدگی میتوان موجب تغییر مرفولوژی و تغییر خواص مواد و افزایش مقدار اثربخشی حفاظتی شد (۴۶، ۴۷). مقدار فیلر و پراشیدگی فیلر از جمله فاکتورهای موثر بر

۱ - نسبت طول به قطر

لایه نیم کننده است.

مطالعات گذشته نشان دادند عوامل دیگری مانند نوع پلیمر، مقدار نانوذرات و ضخامت در اثربخشی حفاظتی سپرهای ساخته شده نقش اصلی دارند (۴۰، ۴۴). در بسیاری از این مطالعات از پلیمرهای رسانا مانند پلی آنیلین، پلی استایرن و پلی پیرول (۲۰، ۶۰، ۶۱) به عنوان بستر استفاده شده است که نشان می‌دهند خواص الکتریکی بستر، نقش مهمی در اثربخشی حفاظتی حفاظ‌های الکترومغناطیس ساخته شده دارد. پلی آنیلین، پلی استایرن و پلی پیرول پلیمرهای ذاتاً رسانا هستند که رسانایی الکتریکی و ثابت دی الکتریک بالایی دارند (۶۲). مقدار مقاومت الکتریکی حجمی برای مواد دی الکتریک بیش از  $10^{11}$  اهم. سانتی متر است در حالیکه این مقدار برای مواد رسانا  $10^6 - 10^8$  اهم. سانتی متر می‌باشد (۶۳). مقدار مقاومت الکتریکی حجمی اپوکسی مورد مطالعه  $10^{14}$  اهم. سانتی متر می‌باشد و نوعی پلیمر دی الکتریک است که ثابت دی الکتریک آن نیز کم‌تر از پلیمرهای ذاتاً رسانا است (۱۲) با وجود این، مطالعه حاضر توانست با استفاده از اپوکسی به حفاظی با اثربخشی حفاظتی مطلوب در حوزه بهداشت حرفه‌ای دست یابد و مطالعات فوق قابل توجه بودن یافته‌های این مطالعه را بیش‌تر نشان می‌دهد. با توجه به وجود اپوکسی، حفاظ‌های ساخته شده نوعی دی الکتریک اتلافی (محیطی با رسانایی جزئی) می‌باشند (۲۲). ماده دی الکتریک با اتلاف کم، یک عایق خوب اما ناکامل است که ضریب رسانایی آنها غیر صفر است و بخش موهومی گذردهی الکتریکی در آنها عدد کوچکی می‌باشد (۲۹) و می‌تواند دارای اثربخشی حفاظتی باشد. همان‌طور که نمودار شماره ۲ نیز نشان می‌دهد رسانایی الکتریکی حفاظ‌های ساخته شده در این مقاله نیز غیر صفر بوده و بخش موهومی گذردهی الکتریکی در آنها عدد کوچکی می‌باشد.

یکی دیگر از عوامل موثر بر اثربخشی حفاظتی، مقدار نانوذرات به کار رفته می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته اغلب از مقادیر بالایی از نانوذرات پایه فلزی استفاده شده است. کیو و همکاران از ۴۰ درصد وزنی نانوذرات اکسید آهن (۶۴)، دارویش و همکاران از ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی نانوذرات فریت (۶۵)، سانی و همکاران از ۲۰، ۸۰ و ۱۲۰ قسمت نانوذرات فریت نیکل (به ازای ۱۰۰ قسمت کائوچو) (۳۸)، چن و همکاران از ۶۰ درصد وزنی از نانوذرات فریت (۶۶)، کینگ و همکاران از ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی پولک‌های کربونیل آهن (۳۶) و وینایاسری و همکاران از ۸۰ قسمت نانوذرات فریت استرانیموم (به ازای ۱۰۰ قسمت آکریلونیتریل) (۴۰) در مطالعات خود استفاده کردند. این در حالی است که در مطالعه حاضر، فقط با استفاده از ۷ درصد وزنی نانوذرات اکسید نیکل به مقدار قابل ملاحظه و مطلوبی از اثربخشی حفاظتی برای مقاصد بهداشت حرفه‌ای دست یافته شد.

هم‌چنین امتیاز قابل توجه دیگر این مطالعه نسبت به پژوهش‌های قبلی، سهولت کاربرد و سطح بالای ایمنی نانوذرات به کار رفته در آن است. در برخی از پژوهش‌های پیشین از نانوذرات آهن و نیکل و کربونیل آهن که بسیار واکنش پذیر بوده و در تماس با هوا به شدت قابلیت اشتعال خودبخودی دارند (۱۶، ۶۷-۶۹) به عنوان فیلر استفاده شد که ترکیب نمودن آنها با سایر مواد نیازمند استفاده از تجهیزات خاص نظیر اتاقک خلاء بود (۱۶). در حالی که نانو ذرات اکسید نیکل با داشتن سطح بالای ایمنی و بدون نیاز به اتاقک خلاء (۷۰) در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

در این مطالعه مقدار عمق نفوذ  $17/34$  سانتی متر در حفاظ  $2-5$  mm (بیش‌تر از ضخامت حفاظ‌های ساخته شده بود. وقتی ضخامت شیلد از عمق نفوذ کوچک‌تر باشد با ایجاد انعکاس‌های متوالی

برابر خوردگی از جمله مزایای دیگری است که آن را به عنوان جایگزین شایسته‌های برای حفاظ‌های فلزی معرفی و استفاده از این حفاظ را برای اهداف بهداشت حرفه‌ای ضروری می‌سازد. نبود مطالعات مشابه در بهداشت حرفه‌ای و سایر علوم که در آن‌ها از اپوکسی و نانوذرات اکسید نیکل برای ساخت حفاظ‌های محافظ در برابر پرتوهای میکروویو باند ایکس استفاده کرده باشند، از جمله محدودیت‌های این مطالعه بود.

### تشریح و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از رساله دکتری در دانشگاه تربیت مدرس بوده است. بدین وسیله از آقای مهندس محمد حسن معینی دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی پلیمر در دانشگاه تربیت مدرس و تمامی عزیزانی که ما را در به ثمر رسیدن این پژوهش یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

### REFERENCES

1. zaroushani v, Khavanin A, Mortazavi S, Jonidi Jafari A, Moeini M, Javadzadeh M. The Role of a New Electromagnetic Shielding in Reducing the Microwave Radiation (A Case Study for the X-Band Frequencies). *Iran Occupational Health Journal*. 12(5):90-9 [Persian].
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/X\\_band](http://en.wikipedia.org/wiki/X_band). X band.
3. Zaroushani V, Khavanin A, Mortazavi SB. Non-thermal Effects of Radar Exposure on Human: A Review Article. *Iranian Journal of Health, Safety & Environment*. 2014;1(1):43-52[Persian].
4. Kitchen R. RF and Microwave Radiation Safety Handbook. Second ed. Oxford,UK: newnes; 2001.

از اثربخشی حفاظتی کل کاسته می‌شود (۱۱) و افت ناشی از انعکاس عامل اصلی کاهش است یا به عبارت دیگر سهم عمده کاهندگی امواج، ناشی از انعکاس می‌باشد (۷۱). بنابراین در حفاظ‌های مورد مطالعه از جمله حفاظ ۲-۵ mm، افت ناشی از انعکاس، عامل اصلی کاهندگی در پرتوهای مورد نظر می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی بهبود اثربخشی حفاظتی حفاظ‌های مورد مطالعه با استفاده از کاهش عمق نفوذ و نیز بررسی کارایی حفاظ‌ها در محیط‌های کاری صورت گیرد.

با توجه به عناصر و شرایط تحقیقاتی به کار رفته در این مطالعه از جمله نیمه رسانا و پارامغناطیس بودن اکسید نیکل (در حالت بالکی)، دی الکتریک بودن اپوکسی، به کارگیری ضخامت کم و مقادیر اندک نانوذرات می‌توان گفت مقدار اثربخشی حفاظتی به دست آمده در حفاظ برتر موجود در این مطالعه (۴-۷ mm) چشم‌گیر بوده و وجود ویژگی‌های دیگری نظیر سبک وزن بودن (۱) و مقاومت در

5. Mailankot M, Kunnath AP, Jayalekshmi H, Koduru B, Valsalan R. Radio frequency electromagnetic radiation (RF-EMR) from GSM (0.9/1.8 GHz) mobile phones induces oxidative stress and reduces sperm motility in rats. *Clinics*. 2009;64(6):561-5.
6. Cleary S, Pasternack B, Beebe G. Cataract incidence in radar workers. *Archives of environmental health*. 1965;11(2):179.
7. Yakymenko I, Sidorik E, Kyrylenko S, Chekhun V. Long-term exposure to microwave radiation provokes cancer growth: evidences from radars and mobile communication systems. *Experimental Oncology*. 2011;33(2):62-70.
8. Wright JM, Bell KM. Radiofrequency radiation

- exposure from RF-generating plant. *Radiation Protection in Australasia*. 2000;17(1):33-7.
9. Cember. H, Johnson TE. Introduction to Health Physics. FOURTH ed. New York, NY: McGraw-Hill Publishing Company; 2009.
  10. Al-Saleh MH, Sundararaj U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. *CARBON*. 2009;47:1738-46.
  11. Pitt CF, Barth BP, Godardf BE. Electrical Properties of Epoxy Resins. *IRE Transactions on Component Parts*. 1957;4(4):110-3.
  12. Khastgira NC, Dasa D, Chakia TK, Chakraborty A. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites. *Composites: Part A* 2000; 31:1069-81.
  13. Guziewicz M, Grochowski J, Borysiewicz M, Kaminska E, Domagala JZ, Rzedkiewicz W, et al. Electrical and optical properties of NiO films deposited by magnetron sputtering. *Opt Appl*.41(2):431-40.
  14. Mohammadyani D, Hosseini SA, Sadrnezhaad SK. Characterization of Nickel Oxide Nanoparticles Synthesized Via Rapid Microwave-Assisted Route. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*. 2012;5:270-6.
  15. Jalali M, Dauterstedt S, Michaud A, Wuthrich R. Electromagnetic shielding of polymer–matrix composites with metallic nanoparticles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011;42:1420-6.
  16. Qing Y, Zhou W, Luo F, Zhu D. Epoxy-silicone filled with multi-walled carbon nanotubes and carbonyl iron particles as a microwave absorber. *Carbon*. 2010;48(14):4074-80.
  17. AkÅÿit AC, Onar N, Ebeoglugil MF, Birlik I, Celik E, Ozdemir I. Electromagnetic and electrical properties of coated cotton fabric with barium ferrite doped polyaniline film. *Journal of applied polymer science*. 2009;113(1):358-66.
  18. Lakshmi K, John H, Mathew KT, Joseph R, George KE. Microwave absorption, reflection and EMI shielding of PU-PANI composite. *Acta Materialia*. 2009;57(2):371-5.
  19. Apesteguy JC, Damiani A, Giovanni DD, Jacobo SE. Microwave absorption behavior of apolyaniline magnetic composite in theX-band. *Physica B*. 2012;407:3168-71.
  20. Bonaldi RR, Siores E, Shah T. Characterization of electromagnetic shielding fabrics obtained from carbon nanotube composite coatings. *Synthetic Metals*. 2014;187:1- 8.
  21. Mohammadi S. electromagnetic wave propagation. *Electromagnetic-2*. Tehran: Payam noor university; 2011[Persian]. p. 47-106.
  22. Mouchka R. Electromagnetic absorption efficiency of polypropylene/ montmorillonite/ polypyrrole nanocomposites. *Materials and Design*. 2011;32 2006-11.
  23. Al-Saleh MH, Al-Anid HK, Hussain YA. CNT/ ABS nanocomposites by solution processing: Proper dispersion and selective localization for low percolation threshold. *Composites: Part A*. 2013;46 53-9.
  24. Zakaria MR, Akil HM, Kudus MHA, Othman MBH. Compressive properties and thermal stability of hybrid carbon nanotube-alumina filled epoxy nanocomposites. *Composites Part B*. 2016;91:235-42.
  25. Al-Saleh MH, Sundararaj U. A review of vapor

- grown carbon nanofiber/polymer conductive composites. *Carbon*. 2009;47(1): 2-22.
26. Baniani P. Design and Fabrication of Mutylayer Electromagnetic absorbing Nanocomposite Structure and Study the Effect off Interfacial Layer on its Absorbing Properties. Tehran: Tarbiat Modares University; 2013 [Persian].
  27. Mohammed s. Propagation of electromagnetic waves. *electromagnetic-2*. Tehran: Payam Noor university; 2010 [Persian]. p. 47-106.
  28. Moeini MH, family MHN, Fororaghi K, Nemati M. Radar absorbent materials, from theory to design. Tehran: Soroush Paya; 2013.
  29. Chung DDL. Materials for Electromagnetic Interference Shielding. *J Mater Eng Perform*. 2000;9(3):350-4.
  30. Song W-L, Cao M-S, Lu M-M, Bi S, Wang C-Y, Liu J, et al. Flexible graphene/polymer composite films in sandwich structures for effective electromagnetic interference shielding. *CARBON*. 2014;66:67-76.
  31. Ferdosian r, Yuan Z, Anderson M, Xu CC. Thermal performance and thermal decomposition kinetics of lignin-based epoxy resins. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016.
  32. Mamani A, Ebrahimi M, Fard MA. Improving the thermal, fire resistance and mechanical properties of epoxy resin using expandable graphite *New advanced materials and coatings*. 2013 [Persian];6(410-419).
  33. kumar SA, Denchev Z, Alagar M. Synthesis and thermal characterization of phosphorus containing siliconized epoxy resins. *European Polymer Journal*. 2006;42:2419-29.
  34. Miller DL, Vano E, Bartal G, Balter S, Dixon R, Padovani R, et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2010;33(2):230-9.
  35. Qing Y, Min D, Zhou Y, Luo F, Zhou W. Graphene nanosheet- and flake carbonyl iron particle-filled epoxy-silicone composites as thin-thickness and wide-bandwidth microwave absorber. *CARBON*. 2015;86:98-107.
  36. Zou C, Yao Y, Wei N, Gong Y, Fu W, Wang M, et al. Electromagnetic wave absorption properties of mesoporous Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/C nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2015;77:209-14.
  37. Sunny V, Kurian P, Mohanan P, Joy PA, Anantharaman MR. A flexible microwave absorber based on nickel ferrite nanocomposite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;489(1):297-303.
  38. Liu Y. EMI shielding performance of nanocomposites with MWCNTs, nanosized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe. *Composites: Part B*. 2014;63:34-40.
  39. Vinayasree S, Soloman MA, Sunny V, Mohanan P, Kurian P, Anantharaman MR. A microwave absorber based on strontium ferrite-carbon black-nitrile rubber for S and X-band applications. *Composites Science and Technology*. 2013;82:69-75.
  40. Yang Y, Gupta MC, Dudley KL. Studies on electromagnetic interference shielding characteristics of metal nanoparticle-and carbon nanostructure-filled polymer composites in the Ku-band frequency. *Micro & Nano Letters, IET*. 2007;2(4):85-9.



41. Jain RK, Dubey A, Soni A, Gupta SK, Shami TC. Barium titanate flakes based composites for microwave absorbing applications. 2013 Contract No.: 4.
42. Bayat M, Yang H, Ko FK, Michelson D, Mei A. Electromagnetic interference shielding effectiveness of hybrid multifunctional Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/carbon nanofiber composite. *Polymer*. 2014;55(3):936-43.
43. Gargama H, Thakur AK, Chaturvedi SK. Polyvinylidene fluoride/nanocrystalline iron composite materials for EMI shielding and absorption applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;654:209-15.
44. Chung DDL. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*. 2001;39(2): 279-85.
45. Huo J, Wang L, Yu H. Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption. *Journal of materials science*. 2009;44(15):3917-27.
46. Li J, Kim J-K. Percolation Threshold of Conducting Polymer Composites Containing 3D Randomly Distributed Graphite Nanoplatelets. *composites Science and Technology*. 2007:1-7.
47. Huang J-C. EMI shielding plastics: a review. *Advances in polymer technology*. 1995;14(2):137-50.
48. Apesteguy JC, Damiani A, DiGiovanni D, Jacobo SE. Microwave-absorbing characteristics of epoxy resin composites containing nanoparticles of NiZn- and NiCuZn-ferrites. *Physica B: Condensed Matter*. 2009;404(18):2713-6.
49. Phang SW, Tadokoro M, Watanabe J, Kuramoto N. Effect of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and TiO<sub>2</sub> addition on the microwave absorption property of polyaniline micro/nanocomposites. *POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES*. 2009;20(6):550-7.
50. Lee C-C, Cheng Y-Y, Chang HY, Dong-Hwang C. Synthesis and electromagnetic wave absorption property of Ni-Ag alloy nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009(480):674-80.
51. Lv R, Kang F, Gu J, Gui X, Wei J, Wang K, et al. Carbon nanotubes filled with ferromagnetic alloy nanowires: Lightweight and wide-band microwave absorber. *Applied Physics Letters*. 2008;93(22):223105--3.
52. Kim J-B, Lee S-K, Kim C-G. Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band. *Composites Science and Technology*. 2008; 68 2909-16.
53. Yang L, He H, Liu HB, Zou YH, Chen H, Zhou RQ. Preparation and microwave absorption properties of FeNi/graphite nanocomposites. *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*. 2007;17.
54. Koledintseva K, Ravva PC, Drewniak J, Kitaitsev AA, Shinkov AA. Engineering of Ferrite-Graphite Composite Media for Microwave Shields.
55. Yuan Q, Su C, Huang J, Gan W, Huang Y. Process and Analysis of Electromagnetic Shielding in Composite Fiberboard Laminated with Electroless Nickel-plated Carbon Fiber. *BioResources*.8(3):4633-46.
56. Chen W, Wang J, Wang T, Wang J, Zhang B. Electromagnetic interference shielding properties of nickel-coated carbon fiber veil/acid-functionalized MWCNTs/epoxy multiscale composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015;34(13):1029-39.

57. Wang G, Chen X, Duan Y, Liu S. Electromagnetic properties of carbon black and barium titanate composite materials. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;454(12):340-6.
58. Sabohi N. production of two dimension of nickel oxide nanostructure on nickel sheet and investigation of its photocatalist properties Tehran: Islamic azad university-central tehran branch; 2012 [Persian].
59. Zhao H-t, Zhao H, Zhang G, Ma R-t, Sun X-d. Preparation and properties of the nickel ferrite/polystyrene composites. *Journal of Functional Materials*. 2009;3:035.
60. Oroumei A, Tavanai H, Morshed M. Radiofrequency Shielding by Polypyrrole-Coated Nano and Regular Fibrous Mats. *Journal of electronic materials*.40(11):2256-63.
61. Asl VH-. *Conductive Polymers*. Tehran: Amirkabir University Technology (Tehran Polytechnic); 2014 [ Persian].
62. Pang H. prefaceConductive polymer composites with segregated structures.
63. Qiu G, Wang Q, Nie M. Polypyrrole-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Magnetic Nanocomposite Prepared by Ultrasonic Irradiation. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2006;291(1):68-74.
64. Darwish MA, Saafan SA, El-Kony D, Salahuddin NA. Preparation and investigation of dc conductivity and relative permeability of epoxy/Li-Ni-Zn ferritecomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;385:99-106.
65. Shen G, Cheng G, Cao Y, Xu Z. Preparation and microwave absorption of M type ferrite nanoparticle composites. *Materials Science-Poland*. 2010;28(1):327-34.
66. SIGMA-ALDRICH. Iron-Material Safety Data Sheet 2007. Available from: [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com).
67. Nanomaterials UR. Nickel Nanoparticles (Ni)-Material Safety Data Sheet. Available from: [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com).
68. SIGMA-ALDRICH. Carbonyl iron-Material Safety Data Sheet 2012. Available from: [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com).
69. Nanomaterials UR. Nickel Oxide Nanoparticles (NiO)-Material Safety Data Sheet. Available from: [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com).
70. Saini P, Choudhary V, Vijayan N, Kotnala RK. Improved electromagnetic interference shielding response of poly (aniline)-coated fabrics containing dielectric and magnetic nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*.116(24):13403-12.

## Investigation of factors influencing the efficacy of electromagnetic shielding in X band frequency range

Vida Zaroushani<sup>1</sup>, Ali Khavanin<sup>2\*</sup>, Ahmad Jonidi Jafari<sup>3</sup>, Seyed Bagher Mortazavi<sup>4</sup>  
Farahnaz Khajenasiri<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Assistant Professor, Department of Social Medicine, School of Medicine, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

### Abstract

**Introduction:** Due to the importance of engineering controls for prevention of microwave exposure, this study was conducted to design and construct a novel electromagnetic shielding and also to examine the factors influencing shielding efficacy in X band frequency range.

**Material and Method:** This study used Resin Epoxy as matrix and nano-Nickel Oxide as filler to prepare the composite plates with three different thicknesses (2,4, and 6 mm) and four different weight percentages (5,7,9 and 11). The fabricated composites characterized using X-ray diffraction and Field Emission Scanning Electron microscopy. Shielding effectiveness, percolation depth, and percolation threshold were measured using Vector Network Analyzers. Thermal Gravimetric Analysis was conducted to study the temperature influence on weight loss for fabricated composites.

**Result:** A maximum shielding effectiveness value of 84.18% was obtained for the 11%-6mm composite at 8.01 GHz and the 7%-4mm composite exhibits a higher average of shielding effectiveness of 66.72% at X- band frequency range. The 4mm thickness was optimum and critical diameter for composite plates; and percolation depth was obtained greater than thickness of composites. However, increasing the nickel oxide content did not show noticeable effect on the shielding effectiveness. Thermal Gravimetric Analysis showed that the study shields were resistant to temperature up to 150 °C without experiencing weight loss. What is more, the results indicated that Nickel oxide Nano particles had desirable distribution and dispersion in epoxy matrix and percolation threshold was appeared in low content of nickel oxide nanoparticles.

**Conclusion:** A novel electromagnetic shield using low thickness and few content of nanoparticle with noticeable efficacy was properly designed and constructed in the field of occupational health. In addition, this shield has low cost, easy to manufacture, resistance to wet/corrosion, and low weight. Epoxy/nickel oxide composite can represent a new generation of electromagnetic shielding, which is considered as a promising candidate for occupational protection against microwave exposure. It is recommended that future studies improve the shielding effectiveness by decreasing the percolation depth and investigate the efficacy of the fabricated shield in the workplaces.

**Keywords:** Composite Shielding, Electromagnetic, Microwave, Nickel Oxide, Occupational Protection

\* Corresponding Author Email: [khavanin@modares.ac.ir](mailto:khavanin@modares.ac.ir)