



وزن نقش الگوی سپر الکترو مغناطیسی جدید در کاهش امواج مایکروویو در باند بسامدی ایکس

ویدا زراوشانی^۱، علی خوانین^۲، سید باقر مرتضوی^۳، احمد جنیدی جعفری^۴، محمد حسن معینی^۵، میلاد جوادزاده^۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۰۷

تاریخ ویرایش: ۹۴/۰۶/۰۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۲۳

چکیده

زمینه و هدف: باند بسامدی ایکس دارای محدوده بسامدی ۸-۱۲/۵ گیگاهرتز بوده و کاربردهای متنوعی مانند کنترل ترافیک هوایی، ارتباطات ناوربری دریایی و غیره دارد. عدم کنترل مواجهه با این امواج می‌تواند باعث آسیب به سلامت شاغلین شود. استفاده از حفاظ، راهکار کنترلی برتر در پیشگیری از مواجهه با امواج مایکروویو است. در این مطالعه سعی شد با استفاده از نانو ذرات اکسید نیکل و رزین اپوکسی، سپر الکترومغناطیس جدیدی جهت کنترل این امواج ساخته شود.

روش بررسی: در این تحقیق از رزین اپوکسی و نانوذرات اکسید نیکل (۷ درصد وزنی) در ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر جهت ساخت نانو کامپوزیت استفاده شد. با استفاده از دستگاه‌های XRD و FESEM مشخصات کیفی و کمی نانو ذرات تعیین و مقادیر اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از دستگاه Vector Network Analyzer اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: میانگین مقادیر اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها برای ضخامت‌های مورد نظر به ترتیب ۲/۶۸، ۵/۰۹ و ۵/۳۵ دسی‌بل بود که معادل ۴۵/۹۸، ۶۹/۰۱ و ۷۰/۸۷ درصد کاهش می‌باشد. حداکثر مقدار کاهش در باند بسامدی ایکس (۸/۹۶ دسی‌بل معادل ۸۷/۲۹ درصد) توسط نانو کامپوزیت ۶ میلی‌متری و در بسامد ۸/۵۱ گیگاهرتز بدست آمد. با افزایش ضخامت، میانگین اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: می‌توان از نانو کامپوزیت‌های ساخته شده به‌عنوان حفاظ مناسب جهت کنترل امواج مایکروویو باند بسامدی X استفاده نمود. می‌توان برای کنترل شدت مایکروویو در بسامدهای ویژه‌ای مانند ۸/۵۲ و ۸/۵۱ گیگاهرتز از سپر ۶ میلی‌متری اپوکسی و نانو کامپوزیتی استفاده نمود اما با توجه به مسائل فنی و اقتصادی، نانو کامپوزیت ۴ میلی‌متری سپر مطلوب جهت کنترل امواج مایکروویو باند بسامدی ایکس (۸-۱۲/۵ GHz) است. با توجه به مقدار میرایی مورد نیاز و نیز صرفه اقتصادی، می‌توان با استفاده از ماتریس کاهندگی، سپر الکترومغناطیس مناسب را انتخاب نمود.

کلیدواژه‌ها: سپر الکترومغناطیس، مایکروویو، نانو کامپوزیت، اکسید نیکل، اپوکسی، پرتو.

مقدمه

برق (IEEE) این محدوده را ۸-۱۲/۵ گیگاهرتز تعریف نموده است [۴] و کاربردهای متنوعی از جمله ارتباطات ماهواره‌ای، راداری، شبکه‌ای و اینترنتی، فضایی، رادیویی، کنترل ترافیک هوایی، ارتباطات ناوربری دریایی، ایستگاه‌های هواشناسی کاربردهای فراوانی دارد [۳] در یکی از مطالعات قبلی، بر روی ۴۰۵۸۱ سرباز قدیمی که با امواج راداری مواجهه داشتند تحقیق و بررسی به عمل آمد که افزایش معنی‌دار ابتلا به سرطان خون غیر لیمفوسیتیک و نیز افزایش اندک مقدار مرگ و میر را در آن‌ها گزارش

امواج مایکروویو بخشی از امواج الکترومغناطیس هستند که دارای طول موج ۳۰۰ MHz تا ۳۰۰ GHz هستند و در صنایع نظامی، پزشکی، مخابرات و غیره کاربردهای متنوعی دارند [۱، ۲]، در این میان باندهای راداری با محدوده بسامدی ۱-۳۰۰ GHz از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند و به ۱۱ باند بسامدی به نام‌های S, L, C, X, Ku, K, Ka, V, W, mm و μm تقسیم می‌شوند. باند بسامدی X دارای محدوده بسامدی ۸-۱۲ گیگاهرتز بوده [۳] و انجمن مهندسی

۱- دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت حرفه‌ای، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- (نویسنده مسئول) دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. khavanin@modares.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۴- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۵- دانشجوی دکتری مهندسی پلیمر، گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۶- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه مهندسی برق، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

[۳۳] بنابراین استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل داشتن امتیازهایی مانند وزن سبک، قیمت پائین، چندمنظوره بودن، مقاومت در برابر خوردگی و اثربخشی مناسب جهت کنترل امواج میکروویو، برای حفاظت در برابر این امواج گسترش یافته است [۳۳-۳۶]. یکی از پلیمرهایی که کاربرد فراوانی دارد، اپوکسی است. اپوکسی به دلیل داشتن خواص مکانیکی و شیمیایی عالی، خواص الکتریکی مناسب، قابلیت پخت در دمای اتاق^۲، پایداری در برابر حرارت، خواص ضد باکتریایی، انقباض و شکنندگی اندک مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که کمتر ماده‌ای دارای تمام این خواص است [۸، ۳۷، ۳۸]؛ بنابراین در بسیاری از تحقیقاتی که در خصوص ساخت سپرهای الکترومغناطیس انجام شده از اپوکسی رزین استفاده شده است [۸، ۱۰، ۱۲، ۳۷، ۳۹-۴۲]. امروزه با ظهور نانوفناوری، استفاده از نانو کامپوزیت‌ها به‌عنوان لایه محافظ جهت پیشگیری از تداخلات الکترومغناطیسی رویکرد جدیدی است که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۳۴، ۴۰]؛ که در بسیاری از آن‌ها از اپوکسی به‌عنوان ماتریس استفاده شده است [۸، ۱۰، ۱۲، ۳۷، ۳۹-۴۲]. تقریباً از سال ۲۰۰۰ که تحقیقات مختلف در خصوص ساخت سپرهای الکترومغناطیس نانوکامپوزیتی شروع شده از مواد مختلفی مانند نانولوله‌های کربنی تک دیواره و چند دیواره [۱۰، ۳۳، ۳۴، ۳۷، ۴۳-۵۰]، گرافیت [۵۱-۵۳] و نانوکربن بلک و الیاف کربنی [۳۵، ۵۴-۵۷] به‌عنوان پرکننده^۴ استفاده شده است. همچنین مطالعات اندکی یافت شد که از نانوذرات فلزی و ترکیبات آن‌ها در ساخت سپرهای الکترومغناطیسی استفاده کرده بودند. Ohlan و همکاران در سال ۲۰۰۸ بر نانو ذرات فریت باریم [۵۸]، Gairola و همکاران در سال ۲۰۱۰ بر فریت منگنز [۵۹]، Yang و همکاران در سال ۲۰۰۷، Jung و همکاران در سال

داد. این پژوهش می‌تواند نشان‌دهنده تعدادی از شاغلین مورد مواجهه با این امواج باشد [۵]. استفاده‌ی روزافزون از امواج الکترومغناطیس در صنایع مختلف و مشکلات حاصل از آن‌ها از جمله تداخل امواج الکترومغناطیس با تجهیزات مختلف و نیاز به قابلیت اطمینان این دستگاه‌ها و نیز تأثیر این امواج بر سلامت انسان موجب شده تا موضوع استفاده از سپرهای مداخله‌ای الکترومغناطیس^۱ به‌صورت قوی‌تری دنبال شود [۶-۱۲]. اثرات ذهنی و قلبی - عروقی [۱۳-۱۵]، اثرات خونی [۱۶] بیماری‌های قلبی - عروقی [۱۷] اثرات تولیدمثلی [۱۷-۱۹] نمونه‌ای از این عوارض هستند. عدم کنترل مواجهه با باند بسامدی راداری می‌تواند منجر به اثرات زیان‌بار مختلفی از جمله اثرات ژنتیکی [۲۰] کاهش چگالی اسپرم و کاهش باروری مردان تحت مواجهه با امواج رادار [۲۱] آسیب به DNA اسپرم مردان تحت مواجهه با امواج رادار [۲۲] انواع سرطان [۲۰، ۲۳-۲۵] مانند سرطان مغز در پلیس‌هایی که با امواج میکروویو مواجهه شغلی داشته‌اند [۲۶] و اپراتورهایی که در مواجهه با امواج رادار بوده‌اند [۱۵] ابتلا به آب مروارید [۲۷] تحریک رشد سلول‌های سرطانی [۲۸] و استرس اکسیداتیو [۲۹، ۳۰] شود.

بنابراین حفاظت افراد در برابر این امواج امری ضروری است. رعایت حدود استاندارد مواجهه، کاهش زمان مواجهه و استفاده از حفاظ^۲ از جمله روش‌های کنترلی جهت حفاظت افراد در برابر این امواج می‌باشند [۲] و استفاده از حفاظ، راهکار کنترلی برتر در پیشگیری از مواجهه با امواج میکروویو می‌باشد. قبلاً از فویل‌ها و مش‌های فلزی به‌صورت گسترده به‌عنوان سپرهای الکترومغناطیس استفاده می‌شد [۲، ۳۱، ۳۲] اما از آنجایی که سپرهای فلزی نقص‌هایی مانند وزن سنگین و کاهش مقاومت در برابر خوردگی دارند و بیشتر برای بسامدهای پایین مناسب هستند

^۲. قابلیت عمل آوری در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی گراد)

^۴. Filler

^۱. Electromagnetic interference shielding (EMI)

^۲. Shield

کربنی و غیره اشاره نمود [۷۳، ۷۴] اما کمتر به آن جهت ساخت سپر الکترومغناطیس توجه شده است؛ بنابراین با توجه به خلأهای موجود، مخصوصاً در باند بسامدی X، در این مطالعه سعی شد تا با توجه به دی الکتریک بودن اپوکسی و نیز نیمه‌رسانا و پارامغناطیس بودن اکسید نیکل، سپر الکترومغناطیس جدید با رویکرد کنترل مهندسی مواجهه شغلی با امواج مایکروویو باند بسامدی ایکس (۸-۱۲/۵ GHz) ساخته شود.

روش بررسی

ساخت نانو کامپوزیت‌ها، در این تحقیق که به روش تجربی انجام شد از رزین اپوکسی با نام تجاری EI-403 و عامل پخت پلی امید و آمین ایمادازولین با نام تجاری HA-14 (سری محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر) به‌عنوان ماتریس و نانو ذرات اکسید نیکل در اندازه‌ی ۳۵ نانومتر به‌عنوان فیلتر استفاده شد. نانو ذرات اکسید نیکل به شکل کروی و با خلوص ۹۹٪ از شرکت Us-Nanomaterial Research تهیه شد. قبل از ساخت نانو کامپوزیت‌ها، توزین مواد مورد نیاز انجام و از کالیبراسیون و صحت عملکرد دستگاه‌های مورد استفاده اطمینان حاصل گردید.

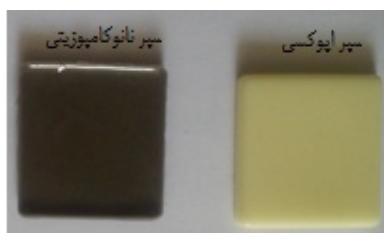
برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها، ابتدا نانو ذرات اکسید نیکل و کلروفورم با یکدیگر مخلوط شده و به مدت ۶۰ ثانیه در حمام اولتراسونیک قرار داده شد. سپس از یک عامل سیلانی با عنوان آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان^۵ به‌عنوان جفت کننده استفاده

۲۰۰۵ بر نانو ذرات نقره [۴۵، ۶۰] و Xiaodong و Chen و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر نانو ذرات باریوم-تیتانیوم [۶۱] مطالعه کرده بودند. در این میان به اکسیدهای فلزی کمتر توجه شده است. تنها تعداد محدودی از مطالعات یافت شد که از Fe₃O₄ به‌عنوان پرکننده و از پلیمرهای رسانا [۶۲-۶۸] و اپوکسی [۴۲] به‌عنوان ماتریس استفاده کرده بودند. اکسید نیکل در حالت بالکی سوپر پارامغناطیس [۶۹] بوده و جزء نیمه‌هادی‌های نوع P محسوب می‌شود [۷۰]. مواد پارامغناطیس گروهی از مواد هستند که موجب تقویت جزئی میدان مغناطیسی می‌شوند، یعنی اگر در داخل سیم‌پیچی ماده‌ای از جنس پارامغناطیسی قرار دهیم، در این صورت میدان مغناطیسی تقویت می‌شود، هرچند این تقویت به اندازه مواد فرو مغناطیس نیست اما قابل توجه است [۷۱]. اکسید نیکل (NiO) نیز به سبب خواص مغناطیسی و الکترونیکی‌اش پژوهش‌های علمی فراوانی را جلب کرده است. اکسید نیکل (NiO) یک نیمه‌رسانای نوع-P است [۷۲، ۷۳]. اخیراً نانوذرات اکسید نیکل به دلیل خواص کاتالیزوری، الکترونی و مغناطیسی خود مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه کاربرد اساسی اکسید نیکل در سیستم باتری می‌باشد اما کاربردهای دیگری مانند ساخت میکروباتری، پوشش دهی پلاستیک و پارچه، ساخت کاتالیست، سنسور دما و گازهای مختلف مانند هیدروژن و مونوکسید کربن، ساخت قطعات سبک در صنعت فضاوردی، استفاده به‌عنوان چسب و رنگ در صنعت لعاب کاری، ساخت سرامیک، استفاده به‌عنوان خازن به همراه نانولوله‌های

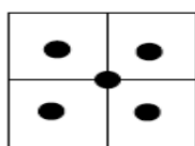
جدول ۱- توزین وزنی مواد مورد استفاده در ساخت نانو کامپوزیت‌های مورد مطالعه

ضخامت نانو کامپوزیت‌های مورد مطالعه (بر حسب میلی‌متر)			مواد مورد استفاده
۶	۴	۲	
وزن مواد مصرفی (بر حسب گرم)			
۷/۴۰۰	۴/۹۳۶	۲/۴۶۸	اپوکسی
۰/۵۱۸	۰/۳۴۶	۰/۱۷۳	نانوذرات اکسید نیکل
۱/۰۸۸	۰/۷۲۵	۰/۳۶۳	کلروفورم
۰/۰۵۲	۰/۰۳۵	۰/۰۱۷	عامل سیلانی

5



شکل ۱- تصویر سپرهای ساخته شده در مطالعه حاضر



شکل ۲- نقاط مورد تصویربرداری با استفاده از FESEM

دستگاه‌های XRD^۷ و FESEM^۸ مشخصات کیفی نانو ذرات تعیین شد (۷۵). شناسایی ترکیب اکسید نیکل با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل X Pert MPD ساخت شرکت فیلیپس هلند انجام شد.

برای بررسی کیفی درجه پراکندگی اغلب از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی استفاده می‌شود [۷۶]. در مطالعه حاضر، بررسی کیفی (از نوع مشاهده‌ای) مورفولوژی نانو کامپوزیت‌های ساخته شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی بررسی گردید. برای تهیه این تصاویر لایه نشانی طلا روی نمونه‌ها انجام و از میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدانی (FESEM) مدل HITACHI S-4160 استفاده گردید. به‌منظور اطمینان از همگن بودن نانو کامپوزیت‌ها، در پنج نقطه از هر یک از نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از FESEM تصویربرداری شد (شکل ۲).

اندازه‌گیری مقدار اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها: با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه^۹ مدل Agilent 8510C که قبل از شروع به اندازه‌گیری، توسط کارشناس مربوطه و بر اساس

شد [۴۰]. در مرحله بعد رزین اپوکسی به مخلوط فوق اضافه و با استفاده از همزن مکانیکی (مدل IKA@RW 20) به مدت ۳ دقیقه با نرخ ۷۰۰ دور در دقیقه با یکدیگر ترکیب شدند.

سپس عامل پخت رزین (HA-14) اضافه و مجدداً مخلوط مورد نظر به مدت ۳ دقیقه با نرخ ۷۰۰ دور در دقیقه در همزن مکانیکی ترکیب و بعد از آن به مدت ۸ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار داده شد.

در نهایت مخلوط مذکور درون قالب‌های سیلیکونی ریخته و به‌منظور حباب‌گیری و خروج کامل کلروفورم، در آن خلأ قرار داده شد. پس از آن، قالب‌ها از آن خارج و در سطحی صاف و تراز و در دمای اتاق قرار داده شد تا عملیات پخت تکمیل شود. نمونه‌های ساخته شده، پس از هفت روز به استحکام کامل رسید و از قالب‌ها خارج شدند.

شایان ذکر است از هر نانوکامپوزیت سه نمونه و در مجموع ۹ نمونه ساخته شد. میانگین وزن نانو کامپوزیت‌های ساخته شده در ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر به ترتیب ۲/۴۷، ۴/۹۴ و ۷/۴ گرم بود. توزین وزنی مواد مورد استفاده جهت ساخت هر یک از نانو کامپوزیت‌های مورد نظر در جدول شماره ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است نانو کامپوزیت‌های مورد نظر در یک نوع غلظت (۷٪ وزنی)، در ۳ ضخامت مختلف (۲، ۴ و ۶ میلی‌متری) و در ابعاد $3/5 \times 3/5$ سانتی‌متر تهیه شدند.

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر نانو ذرات اکسید نیکل بر اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها، نمونه‌های شاهد^۹ ساخته شدند. روش ساخت این نمونه‌ها مانند نانو کامپوزیت‌ها بود با این تفاوت که در این نمونه‌ها از نانو ذرات اکسید نیکل استفاده نشد. تصویر یک نمونه از سپر اپوکسی و نانوکامپوزیتی در شکل ۱ ارائه شده است.

مشخصه یابی نانو ذرات اکسید نیکل: با استفاده از

⁷ X- Ray Diffraction

⁸ Field Emission scanning electron microscope

⁹ Network Analyzer Vector (V.N.A)

^۶ در ادامه مقاله به عنوان گروه اپوکسی نام برده می‌شود.

معادله (۳)

$$A.V (\%) = (1 - (P_i/P_t)) \times 100$$

در اینجا P_i ، P_t و $A.V$ به ترتیب توان ورودی، توان خروجی و درصد کاهندگی هستند.

در مطالعه‌ای که Bonaldi و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام داده‌اند درصد کاهندگی به صورت $SE\%$ و به صورت ذیل محاسبه شده است (۷۸):

معادله (۴)

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

یافته‌ها

نتایج آنالیز نمونه با استفاده از پراش اشعه ایکس و نیز تصویربرداری FESEM در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. نتایج XRD وجود نانوذرات اکسید نیکل را نشان داد (شکل ۳) و تصاویر حاصل از FESEM نیز پراکندگی مناسب نانوذرات اکسید نیکل در بستر اپوکسی را نشان می‌دهد (شکل ۴).

در جدول شماره ۲ مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل اثربخشی حفاظتی در دو گروه نانوکامپوزیت و اپوکسی که هر یک در سه ضخامت ساخته شده‌اند، ارائه شده است.

نتایج مندرج در این جدول نشان می‌دهد در هر دو گروه اپوکسی و نانوکامپوزیت، با افزایش ضخامت، مقادیر SE هم افزایش یافته است.

در نانو کامپوزیت‌ها میانگین^{۱۱} مقادیر SE در ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر به ترتیب ۲/۶۸، ۵/۰۹ و ۵/۳۵ دسی‌بل است که رابطه مستقیم ضخامت و اثربخشی حفاظتی را نشان می‌دهد.

بر اساس این جدول، حداکثر مقادیر SE در هر دو گروه (اپوکسی و نانوکامپوزیت)، در محدوده بسامدی ۸/۵۵ - ۸/۵۱ گیگاهرتز بوده است به جز اپوکسی ۲ میلی‌متری که در بسامد ۱۲/۴۲ گیگاهرتز حداکثر

دستورالعمل شرکت Agilent با استفاده از کیت کالیبراسیون ۳/۵ میلی‌متری مدل 85052B کالیبره گردید، امواج مایکروویو باند بسامدی X (۸-۱۲/۵) گیگاهرتز تولید شدند.

سپس سپرهای ساخته شده که قبلاً در ابعاد ۹/۰×۰/۴ اینچ (مطابق ابعاد موجبر) برش داده بودند، به تفکیک در میان دو موجبر استاندارد مدل WR-90 قرار داده شدند.

با عبور امواج مایکروویو مورد نظر از میان سپر موجود در دو موجبر، پارامترهای پراکندگی مربوطه به مقدار انرژی انعکاسی و عبوری موج که به ترتیب S_{11} و $S_{12}(S_{21})$ نامیده می‌شوند، در بازه‌ی بسامدی ۸-۱۲/۵ گیگاهرتز^{۱۰} اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از معادلات ۱ و ۲ مقدار اثربخشی حفاظتی کل، برای هر یک از سپرهای ساخته شده محاسبه گردید [۴۰، ۷۷]. شایان ذکر است اندازه‌گیری مذکور برای هر سپر سه بار انجام شد که نتایج عیناً تکرار گردید.

$$T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \quad \text{معادله (۱)}$$

$$SE = -20 \log_{10}|T| \quad \text{معادله (۲)}$$

S_{12} و S_{21} : پارامترهای پراکندگی مربوط به مقدار انرژی عبوری موج
T: توان موج عبوری
SE: مقدار اثربخشی حفاظتی^{۱۱}

به‌منظور بررسی توانایی سپرهای ساخته شده در کاهش امواج مایکروویو باند X که هدف این مطالعه بوده است، مقادیر اثربخشی حفاظتی آن‌ها به مقدار درصد کاهندگی^{۱۲} تبدیل شد.

با توجه به مقدار توان ورودی (۱۰ میلی‌وات) و معادله اثربخشی حفاظتی کلی (معادله ۲)، مقدار توان خروجی محاسبه شد. سپس مقادیر درصد کاهندگی با استفاده از فرمول زیر بدست آمد:

^{۱۰}. در محدوده مورد نظر، میزان اثربخشی حفاظتی در فواصل ۵/۶۲۵ تا ۵/۶۲۵ مگاهرتز و در مجموع در ۸۰۱ بسامد، اندازه‌گیری شد.

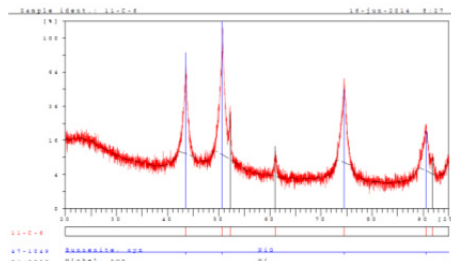
^{۱۱}. Shielding Effectiveness (SE)

^{۱۲}. Attenuation value percentage: A.V (%)

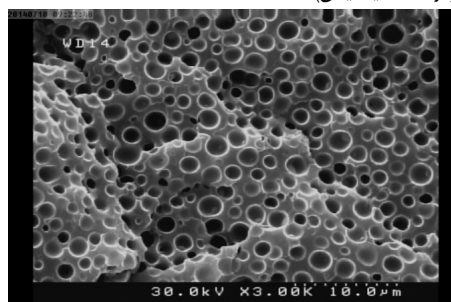
^{۱۳}. تمامی مقادیر میانگین به صورت حسابی اندازه‌گیری شده است.

جدول ۲- مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل اثربخشی حفاظتی در نانوکامپوزیتها و اپوکسی های مورد مطالعه

سپر مورد مطالعه	میانگین اثربخشی حفاظتی بر حسب دسی بل (انحراف استاندارد)	حداکثر مقدار اثربخشی حفاظتی بر حسب دسی بل (بسامد)	حداقل مقدار اثربخشی حفاظتی بر حسب دسی بل (بسامد)
اپوکسی- ۲ میلیمتر	۱/۹ (۰/۵۴)	۳/۰۲ (۱۲/۴۳)	۰/۸۶ (۹/۹۰)
اپوکسی- ۴ میلیمتر	۴/۳۵ (۰/۸۴)	۶/۴۱ (۸/۵۳)	۲/۹۳ (۹/۸۶)
اپوکسی- ۶ میلیمتر	۴/۴۸ (۱/۳۱)	۷/۶۸ (۸/۵۲)	۲/۵۴ (۱۲/۱۲)
نانو کامپوزیت- ۲ میلیمتر	۲/۶۸ (۰/۶۳)	۳/۹۴ (۸/۵۵)	۱/۳۹ (۹/۸۶)
نانو کامپوزیت- ۴ میلیمتر	۵/۰۹ (۰/۹۸)	۷/۵۶ (۸/۵۳)	۳/۴۹ (۱۱/۰۱)
نانو کامپوزیت- ۶ میلیمتر	۵/۳۵ (۱/۴۵)	۸/۹۶ (۸/۵۱)	۳/۲۷ (۱۲/۱۴)



شکل ۳- طیف XRD از نمونه نانو کامپوزیت ساخته شده حاوی نانوذرات اکسید نیکل



شکل ۴۳- تصویر FESEM از نمونه نانو کامپوزیت ساخته شده حاوی نانوذرات اکسید نیکل

نمودار ۱ تغییرات مقادیر اثربخشی حفاظتی سپرهای اپوکسی ساخته شده را در طول باند بسامدی X نشان می دهد.

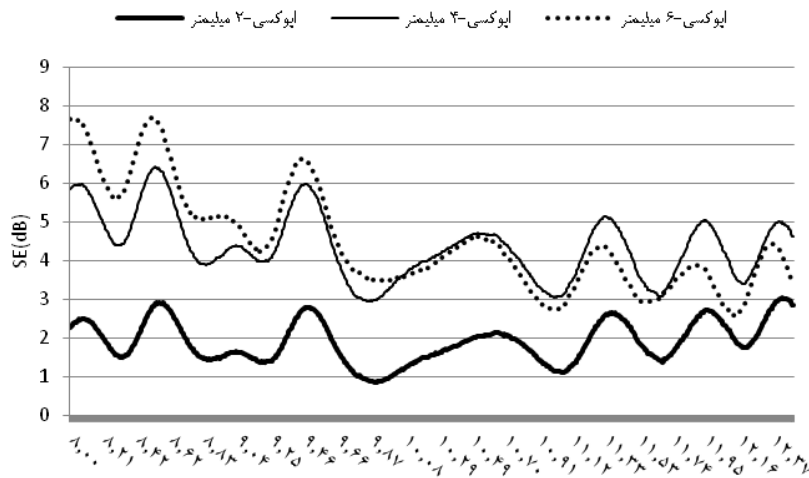
بر اساس این نمودار، مقادیر SE در محدوده ابتدایی باند X بیشتر از سایر قسمت های این باند بسامدی است. همچنین این نمودار نشان می دهد در محدوده ی ابتدایی باند X، مقادیر SE در اپوکسی ۶ میلی متری بیشتر از سایر ضخامت ها است. اما از بسامد ۱۰/۰۵۶ گیگاهرتز به بعد، مقدار اثربخشی حفاظتی در ضخامت ۴ میلی متر بیشتر از ضخامت ۶ میلی متر می شود.

به عبارت دیگر از بسامد ۸ تا ۱۰/۰۵۰ گیگاهرتز، با افزایش ضخامت، مقادیر SE هم افزایش می یابد. اما از بسامد ۱۰/۰۵۶ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز، مقادیر اثربخشی حفاظتی با افزایش ضخامت ارتباط مستقیم ندارد. علاوه بر این، نمودار مذکور نشان می دهد، با افزایش بسامد، مقادیر SE کاهش داشته است. در ضخامت ۶ میلی متر، میانگین اثربخشی حفاظتی تا قبل از بسامد ۱۰/۰۵۶ برابر با ۵/۴۶ دسی بل و بعد از آن، ۳/۶۶

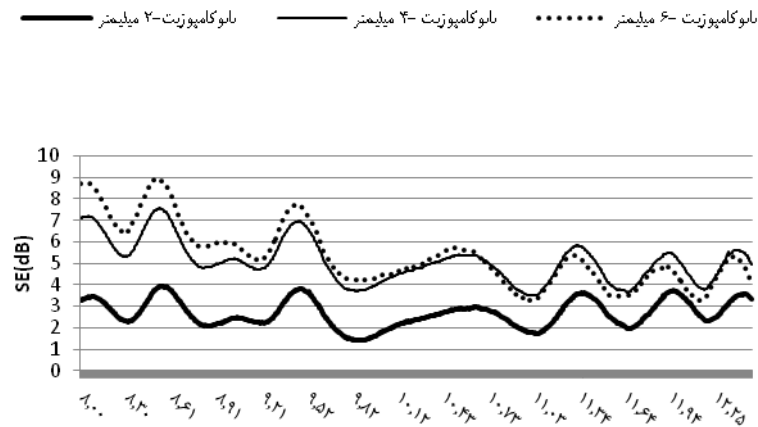
اثربخشی را داشته است. حداکثر مقادیر SE در هر دو گروه (اپوکسی و نانو کامپوزیت)، در ضخامت ۶ میلی متر بوده که در گروه اپوکسی و نانو کامپوزیت به ترتیب ۷/۶۸ دسی بل (در بسامد ۸/۵۲ گیگاهرتز) و ۸/۹۶ دسی بل (در بسامد ۸/۵۱ گیگاهرتز) می باشد.

اپوکسی و نانو کامپوزیت به ترتیب ۷/۶۸ دسی بل (در بسامد ۸/۵۲ گیگاهرتز) و ۸/۹۶ دسی بل (در بسامد ۸/۵۱ گیگاهرتز) می باشد. شایان ذکر است بسامدهای ارائه شده در این جدول برحسب گیگاهرتز می باشد. به عبارت دیگر در میان سپرهای ساخته شده، ضخامت ۶ میلی متر در گروه اپوکسی و نانو کامپوزیت اختصاصاً برای بسامدهای ۸/۵۲ و ۸/۵۱ گیگاهرتز، بیشترین اثربخشی را داشته اند.

بر اساس داده های مندرج در این جدول، حداقل اثربخشی حفاظتی در بسامدهای ۹/۹۰ و ۹/۸۶ گیگاهرتز بدست آمده که به ترتیب مربوط به اپوکسی- ۲ میلی متر و نانو کامپوزیت- ۲ میلی متر می باشد.



نمودار ۱- تغییرات مقادیر اثربخشی حفاظتی هر یک از سپرهای اپوکسی ساخته شده در باند بسامدی X



نمودار ۲- تغییرات مقادیر اثربخشی حفاظتی هر یک از سپرهای نانوکامپوزیتی ساخته شده در باند بسامدی X

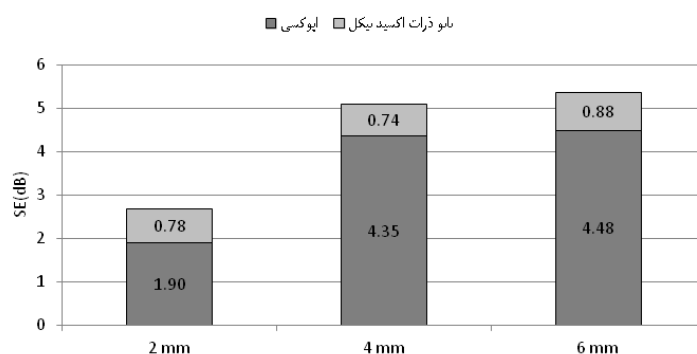
گیگاهرتز به بعد، نانوکامپوزیت ۴ میلی متری دارای اثربخشی حفاظتی بیشتری می باشد. به عبارت دیگر، در محدوده‌ی بسامدی ۱۲/۵ - ۱۰/۶۸ گیگاهرتز، مقادیر اثربخشی حفاظتی با افزایش ضخامت ارتباط مستقیمی ندارد. در نانوکامپوزیت ۶ میلی متری میانگین اثربخشی حفاظتی تا قبل از بسامد ۱۰/۶۸ برابر با ۶/۱۰ دسی بل و بعد از ۴/۲۵ دسی بل شده است و این موضوع را نشان می دهد. همچنین این نمودار نشان می دهد با اضافه شدن نانو ذرات

دسی بل شده است که تبیین کننده دو مسئله مذکور می باشد. نمودار ۲ تغییرات مقادیر اثربخشی حفاظتی (بر حسب دسی بل) ضخامت های مختلف نانوکامپوزیت مورد مطالعه را در طول باند بسامدی X نشان می دهد. بر اساس این نمودار، مقادیر SE در این سپرها، در محدوده ابتدایی باند X بیشتر از سایر بخش های این باند بسامدی است. در این سپرها نیز مانند سپرهای اپوکسی، در ابتدا ضخامت ۶ میلی متری اثربخشی بیشتری را داشته است اما از بسامد ۱۰/۶۸

جدول ۳- مقادیر میانگین و حداکثر کاهندگی سپرهای مورد مطالعه

ضخامت‌ها (بر حسب میلی‌متر)			گروه‌های مورد مطالعه
۶	۴	۲	
میانگین درصد کاهندگی			اپوکسی نانوکامپوزیت
۶۴/۳۵	۶۳/۳۰	۳۵/۴۰	
۷۰/۸۷	۶۹/۰۱	۴۵/۹۸	
حداکثر درصد کاهندگی			اپوکسی (بسامد)*
۸۲/۹۵	۷۷/۱۵	۵۰/۱۶	
(۸/۵۲)	(۸/۵۳)	(۱۲/۴۳)	
۸۷/۲۹	۸۲/۴۵	۵۹/۶۰	نانوکامپوزیت (بسامد)
(۸/۵۱)	(۸/۵۳)	(۸/۵۵)	

*بسامد مورد نظر بر حسب گیگاهرتز می باشد.



نمودار ۳- سهم فیلر و ماتریس در بر اثربخشی حفاظتی سپرهای نانوکامپوزیتی (بر حسب دسی بل)

محاسبه شد که نتایج هر دو کاملاً یکسان بود. این جدول نشان می‌دهد با افزوده شدن نانوذرات اکسید نیکل به اپوکسی، میانگین درصد کاهندگی آن‌ها در ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر از ۳۵/۴۰، ۶۳/۳۰ و ۶۴/۳۵ درصد (در نانوکامپوزیت‌ها) افزایش یافت. بر این اساس، مقدار کاهندگی در نانوکامپوزیت‌های ساخته شده بیشتر از نمونه‌های اپوکسی است. این جدول نشان می‌دهد، الگوی کاهندگی در هر دو گروه، روند صعودی دارد.

نمودار ۳ سهم نانو ذرات اکسید نیکل و اپوکسی در ایجاد اثربخشی حفاظتی کل در نانوکامپوزیت‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. این مقادیر از تفاضل مقادیر میانگین اثربخشی حفاظتی هر یک از نمونه‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت بدست آمد.

اکسید نیکل به اپوکسی، برتری SE در ضخامت ۴ میلی‌متر نسبت به ضخامت ۶ میلی‌متر به بسامدهای بالاتر در باند X کشیده می‌شود به گونه‌ای که در محدوده‌ی بسامدی ۶۸/۱۰-۸ گیگاهرتز، نانوکامپوزیت ۶ میلی‌متری دارای اثربخشی حفاظتی بیشتری نسبت به دو ضخامت دیگر است؛ به عبارت دیگر، این نانوکامپوزیت نسبت به ضخامت مشابه خود در گروه اپوکسی، در محدوده وسیع‌تری از باند بسامدی X، دارای اثربخشی حفاظتی بیشتری شده است.

علاوه بر این مقادیر اثربخشی حفاظتی سپرهای ساخته شده بر اساس درصد کاهندگی نیز محاسبه و در جدول شماره ۳ ارائه شده است. شایان ذکر است، درصد کاهندگی با استفاده از هر دو معادله‌ی ۲ و ۳

پایین تر مناسب هستند و این یکی از معایب این حفاظها می باشد [۴۰].

چگالی آلومینیوم، مس و استیل، به ترتیب ۲/۷، ۸/۹۴ و ۷/۸ گرم بر سانتی متر مکعب است [۸۱]؛ بنابراین وزن سنگین آنها محدودیت دیگری است که در استفاده از این نوع حفاظها وجود دارد [۳۳]. سبک وزن بودن، یکی از مزایای سپرهای نانوکامپوزیتی مورد مطالعه می باشد. برای مثال میانگین وزن سپر نانوکامپوزیتی ۲ میلی متری ساخته شده در این مطالعه حدود ۲/۴۷ گرم بود در صورتی که اگر همین ضخامت با استفاده از ورق آلومینیوم یا مس تهیه می شد (با توجه به چگالی آنها) وزن سپر تهیه شده به ترتیب در حدود ۶/۶۲ (۲/۷ برابر سنگین تر) و ۲۲ گرم (۸/۹ برابر سنگین تر) می بود. این مطالعه با هدف ساخت سپر الکترومغناطیس جدید جهت حفاظت در برابر امواج مایکروویو باند بسامدی X، با استفاده از اپوکسی و نانوذرات اکسید نیکل انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد، استفاده از نانوذرات اکسید نیکل در بستر اپوکسی می تواند منجر به ساخت سپر الکترومغناطیسی قوی تر گردد به گونه ای که مقدار کاهندگی در نانو کامپوزیت های ساخته شده بیشتر از سپرهای اپوکسی است (جدول ۱ و ۳). مقایسه مقادیر درصد کاهندگی بدست آمده در سپرهای اپوکسی و نانوکامپوزیت که در جدول ۳ ارائه شده، نشان می دهد مقادیر اثربخشی حفاظتی در نانو کامپوزیت ها، نسبت به نمونه های اپوکسی به ترتیب ۱۰/۵۸، ۵/۷۱ و ۶/۵۲ درصد افزایش یافته است. این جدول را می توان ماتریس کاهندگی نامید. در این ماتریس، مقدار میرایی حاصل از هر یک از سپرها، برحسب درصد کاهندگی ارائه شده است که با دو رنگ خاکستری و سفید نشان داده شده که به ترتیب مقادیر مساوی و بیش از ۵۰ درصد و کمتر از ۵۰ درصد کاهندگی را نشان می دهند. میانگین درصد کاهندگی گروه های مورد مطالعه در این جدول نشان می دهد، توانایی سپرهای اپوکسی و نانوکامپوزیتی ۴ و ۶ میلی متری بیش از یک لایه نیم کننده است. برای مثال سپر

سهم نانوذرات اکسید نیکل در اثربخشی حفاظتی ضخامت های ۲ تا ۶ میلی متر به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷۴ و ۰/۸۸ دسی بل بوده است. همان طور که مشاهده می شود این نانوذرات موجب افزایش اثربخشی حفاظتی شده اند.

بحث و نتیجه گیری

امواج مایکروویو جزء عوامل فیزیکی زیان آور محیط کار می باشند. اقداماتی که در محیط های کاری برای کنترل این دسته از پرتوها صورت می گیرد شامل کنترل مهندسی (استفاده از شیلد و...)، کنترل مدیریتی (رعایت حد مجاز، کاهش زمان مواجهه، ایجاد فاصله و...)، وسایل حفاظت فردی (لباس های حفاظتی) و خدمات پزشکی (کمک های اولیه و...) می باشد [۷۹، ۸۰]. یکی از انواع کنترل های مدیریتی که کاربرد فراوانی دارد رعایت حد مجاز مواجهه می باشد. OSHA حد مجاز مواجهه را برای محدوده بسامدی ۱۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ گیگاهرتز، ۱۰ میلی وات بر سانتی متر مربع به مدت ۰/۱ ساعت یا بیشتر و ACGIH مقدار TLV را در سال ۲۰۰۸ برای مایکروویو در محدوده بسامدی ۳ تا ۱۵ گیگاهرتز، ۱۰ میلی وات بر سانتی متر مربع برای ۶ دقیقه مواجهه اعلام نموده است [۷۹]. بدیهی است این امر محدودیت های مختلفی را در محیط های کاری تحمیل می کند بنابراین اهمیت و اولویت استفاده از حفاظ به عنوان کنترل های مهندسی بیش از پیش مطرح می گردد. کنترل های مهندسی بهترین رویکرد ایمنی برای مایکروویو و امواج رادیویی هستند و استفاده از حفاظ می تواند به مقدار قابل ملاحظه ای مواجهه را حذف یا کاهش دهد [۷۹]. بیشتر حفاظ هایی که در محیط های کاری استفاده می شوند ورقه ها^{۱۴}، توری ها و فویل های فلزی می باشند [۲، ۳۱، ۳۲، ۷۹] و بیشتر از مس، آلومینیوم و استیل استفاده می شود [۷۹]؛ اما این نوع حفاظها برای بسامدهای

¹⁴. Panels

چندانی بر افزایش میانگین مقدار اثربخشی حفاظتی نداشته باشد؛ بنابراین می‌توان در این مطالعه، ضخامت ۴ میلی‌متر را نوعی ضخامت بهینه جهت حفاظت در برابر امواج مایکروویو باند X معرفی نمود.

تا زمان نگارش این مقاله، مطالعات مشابهی که در آن از اکسید نیکل یا سایر اکسیدهای فلزی که نیمه‌رسانا و پارامغناطیس بوده و در بستر اپوکسی برای ساخت سپر حفاظتی در باند بسامدی ایکس استفاده کرده باشند یافت نشد. تنها تعداد محدودی مطالعه یافت شد که با استفاده از Fe_3O_4 - نیمه‌رسانا و البته فرومغناطیس است - در بستر پلیمرهای رسانا مانند پلی آنیلین، پلی آنیلین/پلی هیدروکسی آنیلین، پلی متیل متیل آکریلات/ پلی پیرول و... برای ساخت سپرهای الکترومغناطیس استفاده کرده بودند و تأثیر پراکندگی نانوذرات Fe_3O_4 را در بستر اپوکسی بررسی نموده بودند [۴۲، ۶۲-۶۴، ۶۶-۶۸، ۸۲، ۸۳].

بنابراین با توجه به محدودیت‌های مذکور، نتایج این مطالعه با استفاده از تئوری‌های موجود در مبحث سپرهای الکترومغناطیس بررسی گردید.

از نظر تئوری، با افزایش ضخامت، مقدار استحفاظ ناشی از جذب مایکروویو بیشتر می‌شود (معادله ۵) [۳۴، ۸۴] که می‌تواند در مجموع، موجب افزایش اثربخشی حفاظتی کل شود.

اما نتایج این مطالعه، هم‌خوانی کامل با این تئوری نداشته به‌گونه‌ای که سپرهای نانوکامپوزیتی ساخته شده در محدوده بسامدی $10/68$ - 8 گیگاهرتز از این تئوری پیروی نموده و از آن به بعد، این تئوری صادق نمی‌باشد.

معادله (۵)

$$SE_A = 20 \log e^{d/\delta}$$

در اینجا d ، δ و SE_A به ترتیب ضخامت حفاظ، عمق پوستی و اثربخشی حفاظتی ناشی از جذب می‌باشد. عمق پوستی یا عمق نفوذ، فاصله‌ای از سطح حفاظ است که در آنجا مقدار انرژی امواج به $(1/e)$ یا ۳۷٪ مقدار اولیه‌ی خود می‌رسد [۳۴، ۸۵].

نانوکامپوزیتی ۶ میلی‌متری توانسته به‌طور متوسط^{۱۵}، بیش از ۷۰ درصد از مقدار اولیه انرژی امواج مایکروویو مورد مطالعه را کاهش دهد. در این مطالعه لایه نیم‌کننده به‌عنوان ضخامت از یک سپر که مقدار تشعشع را به نصف مقدار اولیه کاهش می‌دهد، تعریف می‌شود. همچنین این لایه را می‌توان به‌عنوان، ضخامت نیم‌کننده نیز نام برد (۲). با استفاده از این ماتریس و نیز مقدار میرایی مورد نیاز، می‌توان ضخامت مناسب برای محیط کار را انتخاب نمود. به‌عنوان مثال، اگر در یک محیط کار، مقدار انرژی مایکروویو ۳۰ درصد بیشتر از حد مجاز باشد از تمامی سپرها می‌توان جهت کاهش این ۳۰ درصد استفاده نمود اما با در نظر گرفتن مقدار میرایی مورد نیاز و صرفه اقتصادی، استفاده از سپر نانوکامپوزیت-۲ میلی‌متری توصیه می‌شود. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد سپرهای ساخته شده، در محدوده‌ی پایینی باند X بیشترین اثربخشی را داشته‌اند و این امتیاز در محدوده‌ی بسامدی $8/51$ - $8/55$ گیگاهرتز شاخص‌تر است. به‌گونه‌ای که ضخامت ۶ میلی‌متر در سپرهای اپوکسی و نانوکامپوزیتی ساخته شده، برای بسامدهای $8/52$ و $8/51$ گیگاهرتز ایده‌آل بوده و بیشترین اثربخشی را که به ترتیب برابر $82/95$ و $87/29$ درصد کاهش می‌باشد، داشته‌اند و اثربخشی حفاظتی این سپرها در بسامدهای مذکور، بیش از یک لایه نیم‌کننده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در هر دو گروه اپوکسی و نانوکامپوزیت، با افزایش ضخامت، میانگین مقدار اثربخشی حفاظتی افزایش می‌یابد. تغییر ضخامت از ۲ به ۴ میلی‌متر موجب افزایش چشمگیر در اثربخشی حفاظتی می‌شود درحالی‌که در تغییر ضخامت از ۴ به ۶ میلی‌متر این روند از رشد کمتری برخوردار است (جدول ۱ و ۳).

به نظر می‌رسد در شرایط موجود در این تحقیق، ضخامت ۴ میلی‌متر، به‌گونه‌ای ضخامت بحرانی باشد به این معنی که ضخامت‌های بیش از آن تأثیر

^{۱۵}. متوسط حسابی

در صورتی که افت انعکاس تابعی از نسبت $\sigma_r \mu_r$ است. در اینجا σ_r رسانایی الکتریکی نسبی و μ_r نفوذپذیری مغناطیسی نسبی است [۳۲، ۸۴]. نتایج پژوهش حاضر نشان داد، با افزایش بسامد، مقادیر اثربخشی حفاظتی در نانو کامپوزیت‌های ساخته شده کاهش یافته است (نمودار ۲). احتمال می‌رود با توجه به پارامغناطیس و البته نیمه‌رسانا بودن اکسید نیکل، در این نانو کامپوزیت‌ها، افت ناشی از انعکاس بر افت جذب غالب بوده باشد؛ بنابراین به نظر می‌رسد در نانو کامپوزیت‌های ساخته شده، با افزایش بسامد مقدار استحفاظ ناشی از انعکاس به شدت کاهش یافته به طوری که منجر به کاهش میانگین مقدار اثربخشی کل در محدوده‌ی انتهایی باند X شده است. البته توصیه می‌گردد در پژوهش‌های آتی، به‌طور جداگانه مقدار افت جذب و انعکاس بررسی شود تا تبیین‌کننده این موضوع باشد. در بررسی تغییرات اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها از دیدگاه دوم، بایستی به این موضوع اشاره نمود که مورفولوژی نانو کامپوزیت‌ها عامل بسیار مؤثری بر تغییرات اثربخشی حفاظتی در محدوده‌ی فرکانسی مورد نظر است. بهبود پراکندگی یکی از عوامل مؤثر در ایجاد شبکه رسانایی و در نتیجه، تقویت سپرهای الکترومغناطیسی و افزایش مقادیر اثربخشی حفاظتی است. امروزه ایجاد پراکندگی مطلوب، یک موضوع مهم و البته چالش‌انگیز در بین محققین است که نقش کلیدی در دستیابی به سپرهای قوی‌تر را بازی می‌کند [۸۷]. احتمالاً با بهبود پراکندگی^{۱۶} نانوذرات، می‌توان مورفولوژی را تغییر و علاوه بر کاهش نوسانات مقادیر اثربخشی حفاظتی در طول محدوده‌ی بسامدی مورد نظر، مقدار اثربخشی حفاظتی کل را نیز افزایش داد. علاوه بر این، یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که در شرایط موجود در این مطالعه، نقش اپوکسی در ایجاد اثربخشی حفاظتی کل در نانو کامپوزیت‌های ساخته شده بیش از نانوذرات اکسید نیکل بوده است

در اینجا باید به این نکته اشاره نمود که با توجه به اینکه مقدار عمق پوستی از معادله ۶ بدست می‌آید بنابراین می‌توان با ادغام معادلات ۵ و ۶ مقدار اثربخشی حفاظتی ناشی از جذب را برای مواد رسانا، از رابطه‌ی ۷ نیز بدست آورد.
معادله (۶)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

در اینجا f فرکانس برحسب هرتز، μ نفوذپذیری مغناطیسی است که برابر با $\mu_0 \mu_r$ است. μ_0 نفوذپذیری مطلق هوا است که برابر با $4\pi \times 10^{-7}$ (هنری بر متر) است. σ رسانایی الکتریکی برحسب زیمنس بر متر است [۳۲، ۳۴، ۸۴، ۸۶].

همچنین نتایج این مطالعه نشان داد مقادیر اثربخشی حفاظتی نانو کامپوزیت‌ها در محدوده‌ی انتهایی باند X، کمتر از محدوده‌ی ابتدایی آن است. به عبارت دیگر، با افزایش بسامد، مقادیر اثربخشی حفاظتی در نانو کامپوزیت‌های ساخته شده، کاهش یافته است (نمودار ۲). همچنین در طول این باند بسامدی، نوسانات زیادی در مقادیر اثربخشی حفاظتی دیده می‌شود. علت این تغییرات را می‌توان از دو دیدگاه بررسی نمود. دیدگاه اول مربوط به تأثیر پارامترهای الکتریکی نانو کامپوزیت‌ها و دیدگاه دوم مربوط به تأثیر مورفولوژی نانو کامپوزیت‌ها بر تغییرات اثربخشی حفاظتی است. در دیدگاه اول؛ از نظر تئوری با افزایش بسامد، مقدار استحفاظ ناشی از جذب مایکروویو بیشتر (معادله ۷) اما مقدار استحفاظ ناشی از انعکاس امواج کمتر می‌شود (معادله ۸) [۳۴].
معادله (۷)

$$SE_A = 8.7d\sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

معادله (۸)

$$SE_R = 39.5 + 10 \log \frac{\sigma}{2\pi f \mu}$$

افت جذب تابعی از حاصل ضرب $\sigma_r \mu_r$ است

¹⁶. Dispersion

کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

1. Kubacki R, editor. Biological interaction of pulse-modulated electromagnetic fields and protection of humans from exposure to fields emitted from radars; 2008. IEEE.
2. Cember H, Johnson TE. Introduction to Health Physics. FOURTH ed.; 2009.
3. http://en.wikipedia.org/wiki/X_band. X band. [cited]; Available from.
4. Kitchen R. RF and Microwave Radiation Safety Handbook. Second ed; 2001:11.
5. Groves FD, Page WF, Gridley G, Lisimaque L, Stewart PA, Tarone RE, et al. Cancer in Korean war navy technicians: mortality survey after 40 years. American journal of epidemiology. 2002; 155(9):810-8.
6. Dhawan SK, Ohlan A, Singh K. Designing of Nano Composites of Conducting Polymers for EMI Shielding. Advances in Nanocomposites-Synthesis, InTech, Characterization and Industrial Applications, Rijeka (Croatia); 2011. p. 429-82.
7. Koji Miura MM, Masahiro I, Takashi H, Ken-ichi M. Microwave absorption properties of the nano-composite powders recovered from Nd-Fe-B bonded magnet scraps. Journal of Alloys and Compounds. 2006:1391-5.
8. Huo J, Wang L, Yu H. Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption. Journal of materials science. 2009; 44(15):3917-27.
9. Moilanen P, Luukkainen M, Jekkonen J, Kangas V, editors. EMI shielding effects of carbon nanotube cellulose nanocomposite; 2010. IEEE.
10. Nam IW, Lee HK, Jang JH. Electromagnetic interference shielding/absorbing characteristics of CNT-embedded epoxy composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2011;42 1110-8.
11. Koledintseva MY, Drewniak JL, DuBroff RE, Rozanov KN, Archambeault B. Modeling of shielding composite materials and structures for microwave frequencies. Progress In Electromagnetics Research B. 2009;15:197-215.
12. Bellucci S, Coderoni L, Micciulla F, Sacco I, Rinaldi G, Kuzhir P, et al. Epoxy - nano-carbon shielding coating for super-high-frequency range. IEEE Transactions on Magnetics. 2011:57-60.

(نمودار ۳). توصیه می‌گردد در پژوهش‌های آتی، با مطالعه بر پراکندگی نانوذرات، تأثیر آن بر تغییرات اثربخشی حفاظتی بررسی و نیز عملکرد این سپرها در محیط‌های کاری مطالعه گردد.

در این مطالعه با استفاده از نانوذرات اکسید نیکل و اپوکسی سپر نانوکامپوزیتی جدید و سبک جهت حفاظت در برابر امواج مایکروویو باند بسامدی X ساخته شد. بر اساس شرایط تحقیق حاضر، می‌توان از نانو کامپوزیت‌های ساخته شده به‌عنوان حفاظ مناسب جهت کنترل امواج مایکروویو باند بسامدی X در محیط‌های کاری استفاده نمود. نانوکامپوزیت ۶ میلی‌متری به‌طور میانگین با ۵/۳۵ دسی‌بل کاهش، بیشترین حفاظت را ایجاد نمود و این مقدار معادل ۷۰/۸۷ درصد کاهش از مقدار انرژی اولیه امواج مایکروویو می‌باشد؛ اما با توجه به عدم تفاوت چشمگیر بین مقدار کاهش نانو کامپوزیت‌های ۶ و ۴ میلی‌متری، توصیه می‌شود از نانوکامپوزیت ۴ میلی‌متری به‌عنوان سپر مناسب (از نظر فنی^{۱۷} و اقتصادی) جهت کنترل مواجهه شغلی با امواج مایکروویو باند بسامدی X در محیط‌های کاری استفاده شود. همچنین می‌توان برای کنترل شدت مایکروویو در بسامدهای ویژه‌ای مانند ۸/۵۲ و ۸/۵۱ گیگاهرتز از سپر ۶ میلی‌متری اپوکسی و نانوکامپوزیتی استفاده نمود چراکه می‌تواند بیش از ۸۰ درصد از مقدار اولیه شدت امواج مورد نظر را کاهش دهند. علاوه بر این، می‌توان با توجه به مقدار میرایی موردنیاز و نیز صرفه اقتصادی، با استفاده از ماتریس کاهندگی، سپر الکترومغناطیس مناسب را انتخاب نمود.

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر برگرفته از رساله دکتری در دانشگاه تربیت مدرس بوده و بدین‌وسیله از تمامی عزیزانی که ما را در به ثمر رسیدن این پژوهش یاری نمودند،

^{۱۷} - مقدار کاهندگی مناسب و ضخامت کمتر

Cancer. 2009;124(4):945-51.

25. Richter ED, Berman T, Ben-Michael E, Laster R, Westin JB. Cancer in radar technicians exposed to radiofrequency/microwave radiation: sentinel episodes. *International journal of occupational and environmental health*. 2000;6(3):187-93.

26. Cherry N. Evidence of brain cancer from occupational exposure to pulsed microwaves from a police radar. In: Department HS, editor. Lincoln Lincoln University; 2001.

27. Cleary S, Pasternack B Beebe G. Cataract incidence in radar workers. *Archives of environmental health*. 1965;11(2):179.

28. Yakymenko I, Sidorik E, Kyrlyenko 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.

29. Garaj-Vrhovac V, Gajski G, Pazanin S, Sarolic A, Domijan AM, Flajs D, et al. Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2011;214(1):59-65.

30. Singh S, Mani KV, Kapoor N. Effect of occupational EMF exposure from radar at two different frequency bands on plasma melatonin and serotonin levels. *International Journal of Radiation Biology*. 2015;91(5):426-34.

31. Geetha S, Sathesh Kumar K, Rao CRK, Vijayan M, Trivedi D. EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of applied polymer science*. 2009;112(4):2073-86.

32. Chung DDL. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*. 2001;39(2): 279–85.

33. Zhang CS, Ni QQ, Fu SY, Kurashiki K. Electromagnetic interference shielding effect of nanocomposites with carbon nanotube and shape memory polymer. *Composites Science and Technology*. 2007;67(14):2973-80.

34. Al-Saleh MH, Sundararaj U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. *CARBON*. 2009;47:1738-46.

35. 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.

36. Micheli D, Pastore R, Apollo C, Marchetti M, Gradoni G, Moglie F, et al. Carbon Based Nanomaterial Composites in RAM and Microwave

13. Cherry NJ. Evidence that Electromagnetic Radiation is Genotoxic: The implications for the epidemiology of cancer and cardiac, neurological and reproductive effects. 2002.

14. Dehghan N, Taeb S. Adverse health effects of occupational exposure to radiofrequency radiation in airport surveillance radar operators. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2013;17(1):7.

16. Anders A, Adele G, Leeka K, David S, Anthony S. Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environ Health Perspect*. 2004;112(17):1741-54.

16. Trosic I, Busljeta I, Pavicic I. Blood-forming system in rats after whole-body microwave exposure; reference to the lymphocytes. *Toxicology letters*. 2004;154(1):125-32.

17. Đinđić N, Jovanovi J, Veličković V, Damjanovi I, Đinđić B, Radović J. Radiofrequency and microwave radiation health effects and occupational exposure. *Acta Medica Medianae*. 2011;50(4):74-8.

18. Jensen TK, Bonde JP, Joffe M. The influence of occupational exposure on male reproductive function. *Occupational Medicine*. 2006;56(8):544-53.

19. Anders A, Adele G, Leeka K, David S, Anthony S. Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environmental Health Perspectives*. 2004;112(17):1741-54.

20. Ahlbom A, Green A, Kheifets L, Savitz D, Swerdlow A. Epidemiology of health effects of radiofrequency exposure. *Environmental Health Perspectives*. 2004:1741-54.

21. Møllerløkken OJ. Is fertility reduced among men exposed to radiofrequency fields in the Norwegian Navy? *Bioelectromagnetics*. 2008;29(5): 345-52.

22. 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.

23. Burchfiel CM, Charles LE, Andrew ME, Violanti JM, Gu JK. Cancer incidence among police officers in a US northeast region: 1976-2006. *International journal of emergency mental health*. 2011;13(4):279-89.

24. Degraeve E, Meeusen B, Grivegne AR, Boniol M, Autier P. Causes of death among Belgian professional military radar operators: a 37-year retrospective cohort study. *International Journal of*

structure on the electromagnetic interference shielding efficiency of its epoxy composites. *Carbon*. 2007;45(8):1614-21.

48. Fan Z, Luo G, Zhang Z, Zhou L, Wei F. Electromagnetic and microwave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes/polymer composites. *Materials Science and Engineering :B*. 2006;132(1-2):85-9.

49. Jou WS, Cheng HZ, Hsu CF. A carbon nanotube polymer-based composite with high electromagnetic shielding. *Journal of electronic materials*. 2006;35(3):462-70.

50. Saib A, Bednarz L, Daussin R, Bailly C, Lou X, Thomassin JM, et al. Carbon nanotube composites for broadband microwave absorbing materials. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. 2006;54(6):2745-54.

51. Huang Y, Xu Z, Shen J, Tang T, Huang R. Dispersion of magnetic metals on expanded graphite for the shielding of electromagnetic radiations. *Applied physics letters*. 2007;90(13):133117--3.

52. Al-Ghamdi A, El-Tantawy F. New electromagnetic wave shielding effectiveness at microwave frequency of polyvinyl chloride reinforced graphite/copper nanoparticles. *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(11):1693-701.

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. Das N, Khastgir D, Chaki T, Chakraborty A. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 2000;31(10):106.^{۸۱-۹}

55. A. Cotgreave I. Biological stress responses to radio frequency electromagnetic radiation: are mobile phones really (heat) shocking? *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2005;435(1):227-40.

56. Das N, Chaki T, Khastgir D, Chakraborty A. Electromagnetic interference shielding effectiveness of conductive carbon black and carbon fiber-filled composites based on rubber and rubber blends. *Advances in polymer technology*. 2001;20(3):226-36.

57. Rea S, Linton D, Orr E, McConnell J. Electromagnetic shielding properties of carbon fibre composites in avionic systems. *Mikrotalasna revija*. 2005;11(1):29-32.

58. Ohlan A, Singh K, Chandra A, Dhawan SK.

Shielding Applications. 9th IEEE Conference on Nanotechnology; 2009. 2009. p. 226-35.

37. Kuzhir P, Paddubskaya A, Bychanok D, Nemilentsau A, Shuba M, Plusch A, et al. Microwave probing of nanocarbon based epoxy resin composite films: Toward electromagnetic shielding. *Thin Solid Films*. 2011;519 4114-8.

38. Pitt CF, Barth BP, Godardf BE. Electrical Properties of Epoxy Resins. *IRE Transactions on Component Parts*. 1957;4(4):110-3.

39. Micheli D, Pastore R, Apollo C, Marchetti M, Gradoni G, Primiani VM, et al. Broadband Electromagnetic Absorbers Using Carbon Nanostructure-Based Composites. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2011;59(10):2633-43.

40. 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.

41. Allaouia A, Baia b, S., Chengb HM, Baia JB. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite. *Composites Science and Technology*. 2002;62:1993-8.

42. Ramajo LA, Cristóbal AA, Botta PM, Porto López JM, Reboredo MM, Castro MS. Dielectric and magnetic response of Fe₃O₄/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009;40(4):388-93.

43. Hou C, Li T, Zhao T, Zhang W, Cheng Y. Electromagnetic wave absorbing properties of carbon nanotubes doped rare metal/pure carbon nanotubes double-layer polymer composites. *Materials and Design*. 2011(10):1016-22.

44. Yang S, Lozano K, Lomeli A, Foltz HD, Jones R. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2005;36(5):691-7.

45. 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.

46. Mazov I, Kuznetsov V, Moseenkov S, Usoltseva A, Romanenko A, Anikeeva O, et al. Electromagnetic shielding properties of MWCNT/PMMA composites in Ka-band. *physica status solidi (b)*. 2009;246(11-12):2662-6.

47. Huang Y, Li N, Ma Y, Du F, Li F, He X, et al. The influence of single-walled carbon nanotube

investigation of structure and magnetic properties. Iranian physics conference; 2009; Industrial Isfahan University [Persian].

70. Sabbagh zadeh Ghomi L, Kashani Motlagh MM, Youzbashi AA, editors. Preparation and identification of nano nickel oxide by incorporation of microwave and liquid oxidation national conference of nanotechnology application in pure and applied sciences; 2009 Islamic Azad University-Kermanshah branch [Persian].

71. en.wikipedia.org/wiki/Paramagnetism. Paramagnetism. [cited]; Available from.

72. 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].

73. Mohammadyani D, Hosseini SA, Sadmezhaad SK. Characterization of Nickel Oxide Nanoparticles Synthesized Via Rapid Microwave-Assisted Route. International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2012;5:270-6.

74. Sharanabasava V G, Ravishankar B, Raghunandan D, Venkataraman A. Synthesis and characterization of nickel oxide nanoparticles by self-propagating low temperature combustion method. Recent Research in Science and Technology. 2012;4(4):50-3.

75. Simchi A. acquaintance to nano particles (properties, production and application). Tehran: Sharif industry university; 2008 [Persian]

76. Al-Saleh MH, Sundararaj U. A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites. Carbon. 2009;47(1): 2-22.

77. Schulz RB, Plantz VC, Brush DR. Shielding theory and practice. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. 1988;30(3):187-201.

78. Bonaldi RR, Siores E, Shah T. Characterization of electromagnetic shielding fabrics obtained from carbon nanotube composite coatings. Synthetic Metals. 2014;187:1- 8.

79. RF & Microwave Safety Program. cornell university; 2009.

80. Radiofrequency and Microwave Radiation in the Workplace. Radiation Protection Service of the Occupational Health and Safety Branch, Ministry of Labour; 2009.

81. fa.wikipedia.org. [cited]; Available from.

82. Phang SW, Kuramoto N. Microwave absorption property of polyaniline nanocomposites containing TiO₂ and Fe₃O₄ nanoparticles after FeCl₃·6H₂O treatment. Polymer Composites. 2010;31(3):516-23.

Microwave absorption properties of conducting polymer composite with barium ferrite nanoparticles in 12-18 GHz. Applied physics letters. 2008(93):053114-1--3.

59. Gairola SP, Vermaa V, Kumarb L, Abdullah Dara M, Annapoornib S, Kotnala RK. Enhanced microwave absorption properties in polyaniline and nanoferrite composite in Xband. Synthetic Metals. 2010;160:2318-15.

60. Jung W, Ahn S, Won M. Comparison of electromagnetic-wave shielding effect in glass fiber reinforced nano composites. Journal-Korean Society of Precision Engineering. 2005;22(10):121.

61. Xiaodong Chen G, Yuping Duan and Shunhua Liu. Microwave absorption properties of barium titanate/epoxide resin composites. Journal of Physics D: Applied Physics. 2007(40):1827-30.

62. Saboktakin MR, Maharramov A, Ramazanov MA. Synthesis and characterization of Polyaniline/Poly (p-hydroxyaniline)/ Fe₃O₄ magnetic nanocomposite. Journal of Non-Oxide Glasses. 2009;1(3):211-5.

63. Kavas H, Gnay M, Baykal A, Toprak MS, Sozeri H, Akta B. Negative Permittivity of Polyaniline/Fe₃O₄ Nanocomposite. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. 2013;23(2):306-14.

64. Luo YL, Fan LH, Gao GL, Chen YS, Shao XH. Fe₃O₄/PANI/P (MAA-co-NVP) Multilayer Composite Microspheres with Electric and Magnetic Features: Assembly and Characterization. Journal of nanoscience and nanotechnology. 2009;9(11):6439-52.

65. Liu J, Xu J, Che R, Chen H, Liu M, Liu Z. Hierarchical Fe₃O₄@ TiO₂ Yolk-Shell Microspheres with Enhanced Microwave-Absorption Properties. Chemistry-A European Journal. 2013;19(21):6746-52.

66. Phang SW, Tadokoro M, Watanabe J, Kuramoto N. Effect of Fe₃O₄ and TiO₂ addition on the microwave absorption property of polyaniline micro/nanocomposites. Polymers for Advanced TechnologieS. 2009;20(6):550-7.

67. Qiu G, Wang Q, Nie M. Polypyrrole-Fe₃O₄ Magnetic Nanocomposite Prepared by Ultrasonic Irradiation. Macromolecular Materials and Engineering. 2006;291(1):68-74.

68. Yang C, Du J, Peng Q, Qiao R, Chen W, Xu C, et al. Polyaniline/Fe₃O₄ nanoparticle composite: synthesis and reaction mechanism. J Phys Chem B. 2009;113(15):5052-8.

69. Arabi H, Arasteh N, editors. production of nano nickel oxide by Sol-Jel method and



86. Wang Y, Jing X. Intrinsically conducting polymers for electromagnetic interference shielding. *Polymers for Advanced Technologies*. 2005; 16(4):344-51.

87. 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.

83. Park JO, KY R, SJ P. Silane treatment of Fe₃O₄ and its effect on the magnetic and wear properties of Fe₃O₄/epoxy nanocomposites. *Applied Surface Science*. 2010;256:6945-50.

84. Chung DDL. Materials for Electromagnetic Interference Shielding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000;9(3):350-4.

85. Al-Saleh MH, Sundararaj U. X-band EMI shielding mechanisms and shielding effectiveness of high structure carbon black/polypropylene composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013;46:1-7.

The Role of a New Electromagnetic Shielding in Reducing the Microwave Radiation for the X-Band Frequencies

Vida Zaroushani¹, Ali Khavanin², Seyed Bagher Mortazavi³, Ahmad Jnonidi⁴
Mohammad Hassan Moieni⁵, Milad Javadzadeh⁶

Received: 2015/04/12

Revised: 2015/08/25

Accepted: 2015/09/29

Abstract

Background and aims: X-band microwave with 8-12.5 frequency range has various applications such as air control traffic, navy communication etc. Uncontrolled exposure with microwave can lead to adverse effect on workers. Application of the shielding is superior control for prevention of microwave exposure. The aim of this study is production a new electromagnetic shielding for exposure control of X-band frequency by nano nickel oxide and epoxy resin.

Methods: Nanocomposites prepared by epoxy resin and nano nickel oxide (7 wt%) with 2, 4 and 6 mm thicknesses. Nanoparticles characterized by XRD and FESEM. Shielding effectiveness measured with vector network analyzer.

Results: The Average of shielding effectiveness for three thicknesses were 2.68, 5.09 and 5.35 dB respectively that were equivalent to 45.98, 69.01 and 70.87 attenuation percentage. Maximum attenuation (8.96 dB or 87.29 attenuation percentage) obtained by the nanocomposite with 6mm thickness at 8.51 GHz frequency. The Average of shielding effectiveness increased with increasing the thickness.

Conclusion: these nanocomposites could be used as appropriate shielding for exposure control of X-band frequency in workplace .Both Epoxy and nanocomposite with 6mm thicknesses are useful in specific frequency such as 8.52 and 8.51 GHz. However, According to economical and technical issues, nanocomposite with 4mm thickness is appropriate shield in this study. In according to required attenuation and economical benefit, attenuation matrix can be used for selecting the appropriate electromagnetic shield.

Keywords: Electromagnetic shielding, Microwave, Nanocomposite, Nickel oxide, Epoxy, Radiation.

1. PhD Student of Occupational Health engineering, Department of Occupational Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. (**Corresponding author**) Department of Occupational Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. khavanin@modares.ac.ir

3. Department of Occupational Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4. Department of environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

5. PhD Student of Polymer Engineering, Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

6. MSc Student of electrical engineering, Department of Electrical Engineering, School of Electrical and Computer Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran