

بررسی تأثیر عوامل ساختاری بر اثربخشی حفاظتی سپرهای الکترومغناطیس دولایه

علی خوانین^۱ - احمد جنیدی جعفری^{۲،۳} - علی صفری واریانی^۴ - ویدا زراوشانی^{۵،۶}

v.zaroushani@qums.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۱

چکیده

مقدمه: امروزه افزایش تقاضا برای حفاظت در برابر پرتوهای راداری با استفاده از سپرهای نانوکامپوزیتی رو به افزایش است. در این میان، برای رفع محدودیت‌های سپرهای الکترومغناطیس تک لایه از سپرهای دو یا چند لایه استفاده می‌شود. در این مطالعه سعی شد تا ضمن ساخت نوعی سپر دولایه الکترومغناطیس، اثر برخی فاکتورهای ساختاری مانند ضخامت، هم جنس بودن لایه‌ها و نیز مدت زمان اختلاط بر اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه مورد بررسی قرار گیرد.

روش کار: در این پژوهش از رزین اپوکسی EI-403 و نانوذرات اکسید نیکل برای ساخت سپرهای مورد بررسی استفاده شد. در ابتدا دو گروه سپر تک لایه (با مدت زمان اختلاط ۱۰ و ۶۶ دقیقه) در ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر و با مقدار هفت درصد وزنی از نانوذرات اکسید نیکل و با روش ریخته‌گری ساخته شدند. سپس از قرارگیری بدون فاصله‌ی سپرهای تک لایه بر روی یک دیگر سپرهای دو لایه تهیه شدند. با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه، پرتوهای راداری باند ایکس تولید و پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری و میانگین اثربخشی حفاظتی سپرها محاسبه گردید.

یافته‌ها: بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین اثربخشی حفاظتی سپرهای تک لایه به ترتیب ۸۴/۱۴ و ۴۶/۰۵ درصد و در سپرهای دولایه به ترتیب ۶۶/۳۴ و ۴۱/۹۹ درصد به دست آمد. میانگین اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه با مدت زمان اختلاط ۱۰ دقیقه در ضخامت‌های ۸، ۶ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب ۴۱/۹۹، ۴۵/۴۵ و ۴۲/۲۵ درصد بود. این مقادیر در مدت زمان اختلاط ۶۶ دقیقه به ترتیب به ۵۴/۳۰، ۶۲/۰۷ و ۶۶/۳۴ درصد افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه اثربخشی حفاظتی سپرهای دو لایه کم‌تر از سپرهای تک لایه به دست آمد. اگرچه افزایش مدت زمان اختلاط موجب بهبودی اثربخشی حفاظتی در سپرهای تک و دولایه گردید اما نتوانست موجب افزایش اثربخشی سپرهای دولایه نسبت به سپرهای تک لایه گردد. هم‌چنین افزایش مدت زمان اختلاط در سپرهای دولایه نشان داد، در این سپرها با افزایش ضخامت، اثربخشی حفاظتی کاهش یافت. به نظر می‌رسد در این مطالعه استفاده از سپرهای هم جنس در تهیه سپرهای دولایه منجر به افزایش عمق نفوذ و انعکاس‌های متوالی و در نهایت کاهش چشم‌گیر اثربخشی حفاظتی در سپرهای دو لایه نسبت به تک لایه شده باشد. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آینده، سایر مطالعات در خصوص بهبود اثربخشی حفاظتی این دسته از سپرهای دولایه صورت گیرد.

کلمات کلیدی: سپر الکترومغناطیس تک لایه، سپر الکترومغناطیس دولایه، پرتوهای راداری، اثربخشی حفاظتی

۱- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات تکنولوژی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۶- مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

مقدمه

یک نوع بستر یا بسترهای مختلف استفاده شده بود که در نهایت به ساخت سپرهای چند لایه انجامید که متشکل از لایه های غیر هم جنس بود (۱۶-۲۲). هم چنین مطالعات گذشته نشان دادند مدت زمان اختلاط یکی از عوامل موثر بر بهبودی اثربخشی حفاظتی سپرهای تک لایه است که می تواند با تاثیر بر پراکندگی نانوذرات، موجب تغییر مورفولوژی و ساختار سپرهای نانوکامپوزیتی تک لایه شود (۲۳) اما در مورد سپرهای دولایه، مطالعه ای که در این خصوص انجام شده باشد یافت نشد. از طرفی با توجه به این که طبق جستجوهای انجام شده توسط مولفین، مطالعه ای که از یک نوع نانوفیلر و پلیمر برای ساخت سپرهای دولایه استفاده نموده باشد نیز یافت نشد. بنابراین در این مطالعه سعی شد تا با استفاده از نانوذرات اکسید نیکل به عنوان فیلر و رزین اپوکسی به عنوان بستر نوعی سپر دولایه استفاده شود تا ضمن تهیه نسل جدیدی از سپرهای دولایه، اثر برخی فاکتورهای ساختاری مانند ضخامت، هم جنس بودن لایه ها و نیز مدت زمان اختلاط بر اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه مورد بررسی قرار گیرد.

روش کار

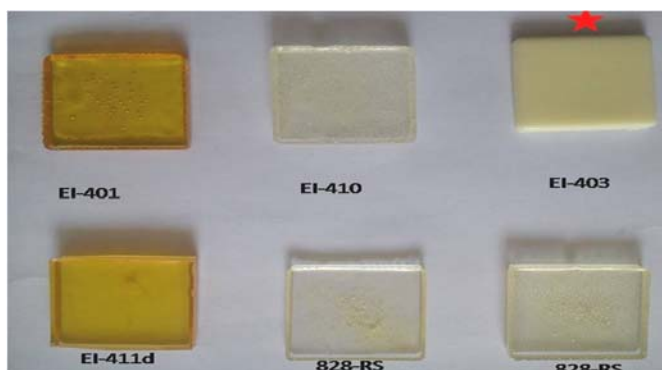
در این پژوهش از رزین اپوکسی EI-403^۳ و نانوذرات اکسید نیکل که مشخصات آن ها در مطالعات قبلی نویسندگان آمده است (۶، ۲۳-۲۵) برای ساخت سپرهای الکترومغناطیس استفاده شد. جهت انتخاب رزین اپوکسی مناسب به عنوان ماتریس، خصوصیتی مانند ثابت دی الکتریک بالا، ویسکوزیته ی کم (بر اساس اطلاعات مندرج در کاربرگ فنی منتشره از سوی

امروزه افزایش تقاضا برای حفاظت در برابر پرتوهای یونیزان و غیر یونیزان روبه افزایش است. مطالعات مختلف گذشته نشان داده است شاغلین تحت مواجهه اطلاعات کافی در خصوص آگاهی ایمنی پرتوها ندارند و این امر می تواند افراد را در معرض خطرات ایمنی و بهداشت شغلی مختلف قرار دهد. (۱) انجام مطالعات اندکی که در داخل کشور در خصوص اندازه گیری پرتوهای مادون قرمز، گاما (۲-۴) و میدان های الکترومغناطیس با فرکانس بیش از حد پایین (۵) انجام شده است لزوم توجه به این امر را بیش از پیش نشان می دهد. این امر در مورد پرتوهای راداری نیز صادق است به گونه ای که در سال های اخیر استفاده از سپرهای الکترومغناطیس نانوکامپوزیتی برای حفاظت در برابر این پرتوها رو به افزایش می باشد. در مطالعات گذشته، سپرهای تک لایه متنوعی با استفاده از نانوذرات پایه فلزی مختلف از جمله نانوذرات آلیاژ فلزی، فریت ها، کربونیل آهن و اکسیدهای فلزی ساخته شده است (۶-۱۵). معمولاً اثربخشی مطلوب سپرهای تک لایه به بازه بسامدی باریکی محدود می شود. امروزه برای حل این مشکل از سپرهای الکترومغناطیس دو یا چند لایه استفاده می گردد. ساخت سپرهای الکترومغناطیس دو یا چند لایه موضوع جدیدی است که به منظور تقویت مقدار اثربخشی حفاظتی سپر الکترومغناطیس و نیز افزایش پهنای باند بسامدی آن، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه سازگاری الکترومغناطیس^۱ و تداخلات الکترومغناطیس^۲ واقع شده است (۱۶-۲۰). در مطالعات گذشته برای ساخت سپرهای دو لایه، عمدتاً از نانوذرات متفاوت به عنوان فیلر در

۳- در این مطالعه از رزین اپوکسی با نام تجاری EI-403 و عامل پخت پلی آمید و آمین ایمادازولین با نام تجاری HA-14 استفاده شد.

۱ - Electromagnetic Compatibility (EMC)

۲ - Electromagnetic Interference (EMI)



شکل ۱. تصویر رزین اپوکسی های مورد آزمایش پس از پخت و حباب زدایی

شدند^۵. لازم به ذکر است برای تعیین مدت زمان اختلاط بهینه از آزمون عمل آوری رزین اپوکسی استفاده شد. بدین منظور زمان های ۱۰، ۲۲، ۴۴، ۶۶ و ۸۸ دقیقه برای عمل آوری رزین اپوکسی مورد آزمون قرار گرفت. سپس حداکثر مدت زمان قرار گیری مخلوط اپوکسی و هاردنر در حمام اولتراسونیک (مدل SONICA، ایتالیا) که به پخت و ژله ای شدن مخلوط پلیمری فوق نیانجامد و قابلیت انتشار نانوذرات را در بستر خود داشته باشد به عنوان مدت زمان اختلاط بهینه در نظر گرفته شد. شایان ذکر است هر دو نوع سپر تک لایه بر اساس تکنیک ریخته گری (۲۶) و مطابق روشی که در پژوهش های قبلی انجام شده بود ساخته شدند (۶، ۷، ۲۳، ۲۵) و فقط در مدت زمان اختلاط نانوذرات (در حلال) با یک دیگر تفاوت داشتند. سپرهای تک لایه مذکور در ابعاد $3/5 \times 3/5$ سانتی متر^۶ که هر یک حاوی هفت درصد وزنی^۷ از نانوذرات اکسید نیکل بودند،

۵- برای مثال کد 1-N-2-4 برای نام گذاری سپر دو لایه ای استفاده شد که برای تهیه آن، از سپرهای تک لایه با ضخامت ۲ و ۴ میلی متر و مدت زمان اختلاط ۱۰ دقیقه استفاده شده بود.

۶- در این مطالعه از قالب های مربعی شکل از جنس سیلیکون و با ابعاد $3/5 \times 3/5$ و ارتفاع ۳ سانتی متر استفاده شد.

۷- با توجه به این که در مطالعات قبلی، بهترین اثربخشی حفاظتی سپر تک لایه، در سپری که حاوی هفت درصد وزنی از نانوذرات نیکل بود به دست آمد بنابراین، در این مطالعه نیز از این درصد وزنی به عنوان مقدار نانوذرات استفاده شد.

شرکت سازنده)، فرآیند پخت مناسب و حباب زدایی آسان^۴ به عنوان معیارهای انتخابی در نظر گرفته شد. بدین منظور چهار نمونه رزین اپوکسی به نام های EI-401، EI-403، EI-411D و EI-410، و 828-RS به همراه هاردنرهای مربوطه مورد آزمایش قرار گرفت که از میان آن ها رزین اپوکسی EI-403 به عنوان ماتریس مناسب برای ساخت سپرهای مورد نظر در این پژوهش انتخاب گردید. شکل شماره (۱) تصویر رزین اپوکسی های مورد آزمایش پس از پخت و حباب زدایی را نشان می دهد.

در این مطالعه، بر اساس مدت زمان اختلاط نانوذرات در حلال (کلروفرم)، دو گروه سپر الکترومغناطیسی تهیه شدند. گروه اول شامل سپرهای تک و دولایه با مدت زمان اختلاط ۱۰ دقیقه و گروه دوم شامل سپرهای تک و دو لایه با مدت زمان اختلاط بهینه (۶۶ دقیقه) بودند. بر این اساس، سپرهای گروه اول و دوم با اضافه نمودن پیشوند عددی ۱ و ۲ به ابتدای کدهای نامگذاری آن ها، از یک دیگر تفکیک

۴- در دسترس بودن تجهیزات مورد نیاز، سهولت روش کار، صرف زمان اندک برای حباب زدایی و نیز عدم مشاهده هر گونه حباب در نمونه، به عنوان معیار تعریف شده برای حباب زدایی آسان در نظر گرفته شد.

یافته ها

نتیجه تعیین مدت زمان اختلاط بهینه نتایج عمل آوری رزین اپوکسی نشان داد که رزین مورد استفاده در این مطالعه در زمان های ۱۰، ۲۲ و ۶۶ دقیقه حالت مایع و مناسب خود را جهت پذیرش و توزیع مناسب نانوذرات حفظ نمود. اما در طی مدت زمان ۸۸ دقیقه، به دلیل ایجاد انرژی گرمایی بالای حاصل از عملیات اولتراسونیک، مخلوط پلیمری به مرحله پخت و ژله ای شدن رسید که باعث تخریب مخلوط مورد نظر شد. از این رو در میان مدت زمان های پایین تر (۱۰، ۲۲ و ۶۶ دقیقه)، حداکثر مدت زمان اختلاط (۶۶ دقیقه) که منجر به پخت و ژله ای شدن اپوکسی نگردید به عنوان مدت زمان اختلاط بهینه در نظر گرفته شد.

نتایج اثربخشی حفاظتی سپرهای تک و دولایه با مدت زمان اختلاط ۱۰ دقیقه

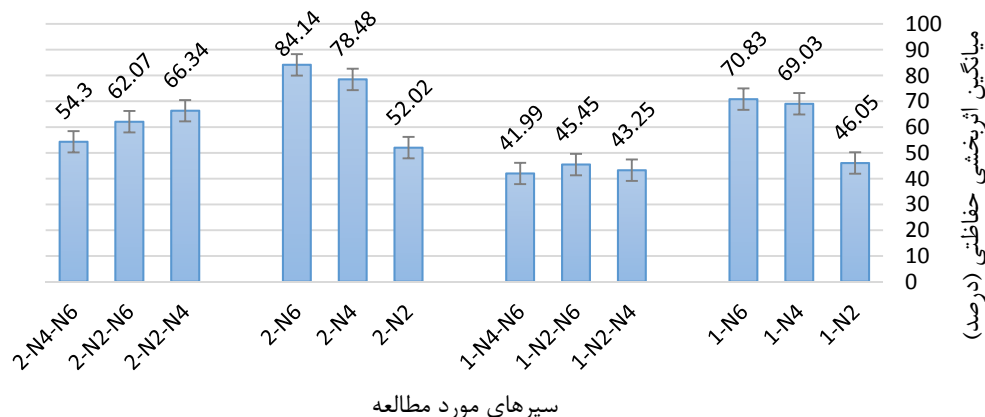
همان طور که در نمودار شماره (۱) مشاهده می شود بیش ترین و کم ترین اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه در این گروه به ترتیب ۴۵/۴۵ و ۴۱/۹۹ درصد است که متعلق به سپرهای 1-N2-N4 و 1-N4-N6 با ضخامت ۶ و ۱۰ میلی متری می باشد. مقایسه اثربخشی حفاظتی سپرهای این گروه نشان داد در ضخامت یکسان، اثربخشی حفاظتی سپر دولایه کم تر از سپر تک لایه است. به گونه ای که در ضخامت ۶ میلی متر اثربخشی حفاظتی سپرهای دو لایه ۲۸/۸۴ درصد کم تر از اثربخشی سپر تک لایه متناظرش بود (نمودار ۱). بررسی نتایج اثربخشی سایر سپرهای این گروه نیز نشان داد میانگین اثربخشی تمامی سپرهای دولایه در این گروه، کمتر از سپرهای تک لایه بود. هم

در ضخامت های ۲، ۴ و ۶ میلی متر ساخته شدند. در مرحله بعد، سپرهای دولایه از قرار گیری بدون فاصله^۸ سپرهای تک لایه بر روی یک دیگر تهیه شدند. با توجه به این که سپرهای تک لایه در سه ضخامت ۲، ۴ و ۶ میلی متر ساخته شدند بنابراین به ترتیب با کدهای N-4، N-2 و N-6 نام گذاری گردیدند. سپرهای دولایه ای که از جفت شدن سپرهای تک لایه تهیه شدند با کدهای N-2-6، N-2-4 و N-4-6 نام گذاری گردیدند که به ترتیب دارای ضخامت ۶، ۸ و ۱۰ میلی متر و همگی حاوی هفت درصد وزنی نانوذرات اکسید نیکل بودند. در این مطالعه در مجموع ۱۲ سپر حفاظتی الکترومغناطیس (۶ سپر تک لایه و ۶ سپر دولایه) تهیه شدند. مقدار کاهش انرژی امواج میکروویو و راداری به عنوان اثر بخشی حفاظتی^۹ و به صورت کمی و بر حسب دسی بل بیان می شود (۲۷-۲۹). در این پژوهش، اندازه گیری اثربخشی حفاظتی سپرهای تک و دولایه طبق روشی که در مطالعه قبلی ارائه شده است انجام گردید. بدین صورت که با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه (مدل E8362B، شرکت Agilent، آمریکا) موجود در پژوهش گاه مخابرات و الکترونیک نصر تهران، ابتدا پارامترهای پراکندگی اندازه گیری و سپس با استفاده از معادله ذیل اثربخشی حفاظتی سپرهای مورد نظر در باند راداری با بسامد ۱۲/۵-۸ گیگاهرتز که به باند بسامدی ایکس موسوم است محاسبه شد (معادله ۱) (۲۳، ۳۰). مشخصه یابی نانوذرات سپرهای تک لایه در مطالعه قبلی نویسندگان ارائه شده است (۲۵).

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

۸ - Without Air Space

۹ - Shielding Effectiveness (SE)



نمودار ۱. میانگین اثربخشی حفاظتی سپرهای تک و دولایه مورد مطالعه در باند بسامدی ایکس

کاهش قابل توجه و محسوس نسبت به سپرهای تک لایه شده است. این موضوع در مقایسه اثربخشی حفاظتی سپرهای تک و دولایه در ضخامت یکسان، بیش از پیش روشن می گردد. به گونه ای که در ضخامت ۶ میلی متر، اثربخشی حفاظتی سپرهای دو لایه (سپر 2-N2-N4) که در مجموع ۶ میلیمتر ضخامت دارد) ۲۹/۸۴ درصد کم تر از اثربخشی سپر تک لایه متناظرش می باشد (نمودار ۱). هم چنین نتایج این بخش نشان داد با افزایش ضخامت، میانگین اثربخشی حفاظتی در سپرهای تک لایه افزایش اما در سپرهای دو لایه کاهش یافته است. با افزایش ضخامت، تغییرات میانگین اثربخشی در سپرهای تک لایه این گروه به ترتیب ۲۶/۴۶ + و ۵/۶۶ + درصد بوده در حالی که این تغییرات برای سپرهای دو لایه به ترتیب ۴/۲۷ - و ۷/۷۷ - درصد می باشد (نمودار ۱).

نتایج اثر مدت زمان اختلاط بر اثربخشی حفاظتی سپرهای تک و دولایه

همان طور که گفته شد نمودار شماره (۱) میانگین اثربخشی حفاظتی را برای هر دو گروه

چنین یافته های این بخش مبین این موضوع است که متغیر ضخامت در سپرهای دولایه این گروه، نقش مشخص و محسوسی در تغییرات اثربخشی این سپرها نداشته است. چراکه با افزایش ضخامت، تغییرات میانگین اثربخشی در سپرهای تک لایه این گروه به ترتیب ۲۲/۹۸ + و ۱/۸ + درصد بوده در حالی که این تغییرات برای سپرهای دو لایه به ترتیب ۲/۲ + و ۳/۴۶ - درصد می باشد.

نتایج اثربخشی سپرهای تک و دولایه با مدت زمان اختلاط ۶۶ دقیقه

همان طور که در نمودار شماره (۱) مشاهده می شود بیش ترین و کم ترین اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه در این گروه به ترتیب ۶۶/۳۴ و ۵۴/۳ درصد است که متعلق به سپرهای 2-N2-N4 و 2-N4-N6 با ضخامت ۶ و ۱۰ میلی متری می باشد. مقایسه اثربخشی حفاظتی سپرهای این گروه نیز نشان داد با وجود ضخامت بیش تر در سپرهای دولایه، اثربخشی حفاظتی در این سپرها دچار

۱۰ - در این مطالعه علامت مثبت به منظور بیان اثر افزایشی و علامت منفی به منظور بیان اثر کاهش بر اثربخشی حفاظتی سپرهای الکترومغناطیس می باشد.

بحث

امروزه افزایش تقاضا برای حفاظت در برابر پرتوهای راداری با استفاده از سپرهای نانوکامپوزیتی رو به افزایش است. در این میان، برای رفع محدودیت های سپرهای الکترومغناطیس تک لایه از سپرهای دو یا چند لایه استفاده می شود. در این مطالعه سعی شد تا ضمن ساخت نوعی سپر دولایه الکترومغناطیس، اثر برخی فاکتورهای ساختاری مانند ضخامت، هم جنس بودن لایه ها و نیز مدت زمان اختلاط بر اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه مورد بررسی قرار گیرد. بررسی متون پیشین نشان داد مطالعات انجام شده در خصوص سپرهای الکترومغناطیس دو یا چند لایه در مقایسه با سپرهای تک لایه از تعداد کم تری برخوردار است. در این میان، مطالعات مشابهی که با استفاده از اپوکسی و نانوذرات اکسیدنیکل به تهیه سپر دو یا چند لایه پرداخته باشند یافت نشد. در بیش تر مطالعات قبلی که از اپوکسی به عنوان بستر استفاده نمودند، از نانوذرات الیاف کربن/گرافن مغناطیس شده (۳۱) کربن بلک (۳۲) کربید تیتانیوم (۳۳) اکسید گرافن و استانتیوم تیتانات (۳۴) الیاف کربن (۳۵) و سایر فیلهای مشابه به عنوان فیلر استفاده کرده بودند. این امر یکی از محدودیت های موجود در این مطالعه بود.

سپرهای تک و دولایه ی ساخته شده در باند بسامدی ایکس نشان می دهد. در این مطالعه، با افزایش مدت زمان اختلاط، میانگین اثربخشی حفاظتی در تمامی سپرهای تک و دو لایه افزایش یافت، به طوری که با افزایش مدت زمان اختلاط در سپرهای تک لایه، میانگین اثربخشی به ترتیب ضخامت به مقدار ۵/۹۷، ۹/۴۵ و ۱۳/۳۱ درصد و در سپرهای دو لایه به مقدار ۲۳/۰۹، ۱۶/۶۲ و ۱۲/۳۱ درصد افزایش یافت (نمودار ۱). علاوه بر این افزایش مدت زمان اختلاط باعث کاهش مقادیر انحراف معیار در اثربخشی حفاظتی سپرهای دو لایه شد (جدول ۱). با توجه به این که در علم آمار انحراف معیار یکی از شاخص های پراکندگی است که نشان می دهد به طور میانگین داده ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند، بنابراین کاهش مقادیر انحراف معیار، نشان داد داده ها به میانگین نزدیکتر شده و پراکندگی آن ها کاهش یافته است. این یافته در مورد سپرهای تک لایه نیز به دست آمد که نتایج آن پیش از این در گزارشات قبلی ارایه شد (۲۳). علاوه بر این نمودار شماره (۱) نشان می دهد افزایش مدت زمان اختلاط موجب افزایش اثربخشی سپرهای تک و دولایه نسبت به حالت قبل شده است. اما هم چنان مقدار اثربخشی سپرهای دولایه کم تر از سپرهای تک لایه است.

جدول ۱. میانگین اثربخشی حفاظتی سپرهای دو لایه مورد مطالعه در باند بسامدی ایکس (بر حسب دسی بل و درصد)

نام سپر دولایه	میانگین اثربخشی (دسی بل)	انحراف معیار (دسی بل)	میانگین اثربخشی (درصد)
1-N2-N4	۲/۴۶	۱/۲۲	۴۳/۲۵
1-N2-N6	۲/۶۳	۱/۲۳	۴۵/۴۵
1-N4-N6	۲/۳۶	۰/۸۳	۴۱/۹۹
2-N2-N4	۴/۷۳	۰/۳۳	۶۶/۳۴
2-N2-N6	۴/۲۱	۰/۳۷	۶۲/۰۷
2-N4-N6	۳/۴۰	۰/۴۶	۵۴/۳۰

در این مطالعه اثر دولایه سازی نوعی از سپرهای تک لایه الکترومغناطیس بر تغییرات اثربخشی حفاظتی آن ها بررسی شد. بدین منظور دو گروه سپر دو لایه (بر اساس مدت زمان اختلاط) تهیه گردید. مقایسه اثربخشی سپرهای تک و دولایه در هر دو گروه نشان داد با این که سپرهای دو لایه نسبت به سپرهای تک لایه از ضخامت بیش تری برخوردار بودند اما اثربخشی حفاظتی آن ها به نحو چشم گیری کم تر از سپرهای تک لایه بود. این موضوع در مقایسه اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه با سپرهای تک لایه در ضخامت یکسان ، بیش تر به چشم می خورد. به گونه ای که اثربخشی حفاظتی سپر های دولایه ۶ میلی متری در گروه اول و دوم به ترتیب ۲۷/۵۸ و ۱۷/۸۰ درصد کم تر از ضخامت متناظر خود در سپرهای تک لایه بودند (نمودار ۱). این امر نشان می دهد در شرایط تحقیقاتی موجود در این مطالعه ، دولایه سازی سپرها مفید نبود و بالعکس موجب کاهش اثربخشی حفاظتی سپرها شد. بررسی تعدادی از پژوهش های گذشته از جمله مطالعات شن و همکاران (۲۰۰۷) ، کیوآ و همکاران (۲۰۱۲) ، مشرام و همکاران (۲۰۰۴) ، داس و همکاران (۲۰۱۵) و هو و همکاران نشان داد بر خلاف یافته های موجود در مطالعه حاضر، در تعدادی از پژوهش های قبلی ، با دولایه شدن جذب ها، اثربخشی حفاظتی نیز افزایش یافته است (۱۹، ۲۰، ۳۶-۳۸).

نکته قابل توجه دیگر در این مطالعه این است که افزایش مدت زمان اختلاط به ۶۶ دقیقه موجب افزایش میانگین اثربخشی حفاظتی سپرهای تک و دولایه گردید. هم چنین کاهش مقادیر عددی انحراف معیار نشان داد افزایش مدت زمان اختلاط

توانست موجب کاهش نوسانات مقادیر اثربخشی سپرها نسبت به حالت قبل گردد (نمودار و جدول ۱). اما با این حال، در سپرهای دولایه ای که مدت زمان اختلاط در آن ها ۶۶ دقیقه بود هم چنان اثربخشی حفاظتی کم تر از سپرهای تک لایه متناظر بود. این در حالی است که مطالعه پیشین نویسندگان نشان داد که افزایش مدت زمان اختلاط نانوذرات در حلال باعث بهبود پراکندگی آن ها در ماتریس و افزایش مقادیر اثربخشی حفاظتی سپر های تک لایه می شود (۲۳) در صورتی که در شرایط تحقیقاتی انجام شده در پژوهش حاضر، این نتیجه در خصوص سپرهای دو لایه به دست نیامد. به عبارت دیگر دولایه سازی سپرها مفید واقع نشد و در مقایسه با سپرهای تک لایه متناظر هم چنان دارای اثربخشی حفاظتی کم تری بودند. شایان ذکر است در مطالعات مشابه قبلی ، پژوهشی که در خصوص بررسی تاثیر مدت زمان اختلاط بر اثربخشی سپرهای دولایه باشد یافت نشد و این امر یکی دیگر از محدودیت های موجود در این مطالعه بود. لذا در ادامه برای یافتن علت احتمالی این نتیجه، از تئوری مکانیسم اثربخشی سپرها استفاده گردید. مقدار اثربخشی حفاظتی کل از مجموع اثربخشی حفاظتی حاصل از انعکاس امواج ، جذب امواج و انعکاس های متوالی به دست می آید (۳۹-۴۲). در میان این سه مکانیسم، انعکاس های متوالی می توانند در شرایط خاصی منجر به کاهش اثربخشی حفاظتی شوند (۴۳). در انعکاس های متوالی موج پس از عبور از جداره ی پوشش و در لحظه ورود به درون پوشش مجدداً با یک ناپیوستگی امپدانسی مواجه می شود که در نتیجه ی آن قسمتی از موج وارد پوشش شده و قسمتی از آن نیز منعکس می

قرار گرفتند نتوانستند شدت میدان الکتریکی را به $0/368$ مقدار اولیه کاهش دهند. از این رو به نظر می رسد عمق نفوذ در این سپرها بیش تر از ضخامت آن بوده که در نهایت منجر به کاهش اثربخشی حفاظتی آن ها شده است.

هم چنین نتایج این مطالعه نشان داد ضخامت سپرهای دولایه یکی از عوامل موثر در تغییرات اثربخشی حفاظتی آن ها بوده است. در سپرهای دولایه گروه اول (با زمان اختلاط ۱۰ دقیقه)، ضخامت نقش موثر و محسوسی در اثربخشی سپرها نداشت به گونه ای که با افزایش ضخامت در این سپرها، ابتدا میانگین اثربخشی $2/2$ درصد افزایش و سپس $3/46$ درصد کاهش داشت. در سپرهای دولایه گروه دوم (با زمان اختلاط ۶۶ دقیقه)، ضخامت نقش مشخص و کاهنده ای در اثربخشی سپرها داشت به گونه ای که با افزایش ضخامت در این سپرها، میانگین اثربخشی کاهش یافت. به عبارت دیگر در سپرهای دولایه گروه دوم، ضخامت به عنوان عامل تضعیف کننده اثربخشی حفاظتی نقش داشت. (نمودار ۱). به دلیل تازگی موضوع، تعداد مطالعات انجام شده در زمینه ساخت سپرهای الکترومغناطیس نانوکامپوزیت دو لایه نسبت به سپرهای تک لایه بسیار کم تر می باشد. در این میان مطالعات مشابه اندکی یافت شد که به این موضوع پرداخته باشند. در برخی از مطالعات پیشین که در خصوص اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه انجام شده بود، از ضخامت لایه تطبیق در سپرهای دولایه به عنوان عامل موثر در اثربخشی حفاظتی این سپرها یاد شده است. در جاذب های دو لایه معمولاً لایه اول با عنوان لایه تطبیق^{۱۳} و لایه دوم با عنوان لایه

گردد. موج وارد شده مجدداً پس از طی جداره به لبه ی بیرونی پوشش می رسد و از آن جا نیز بر اثر ناپیوستگی امپدانسی مجدداً دچار انعکاس و انتقال می شود و این عمل مرتباً تکرار می شود و تشدید اتفاق می افتد (۴۴). به این پدیده، انعکاس متوالی می گویند. اگر ضخامت سپر از عمق نفوذ کم تر باشد، انعکاس های متوالی می توانند به صورت بارزی، اثربخشی حفاظتی کل را کاهش می دهند(۴۳). به نظر می رسد در سپرهای دو لایه موجود در این مطالعه، افزایش عمق نفوذ^{۱۱} موجب کاهش اثربخشی حفاظتی آن ها شده باشد. عمق نفوذ ضخامتی از سپر است که در آن شدت میدان الکتریکی به $\frac{1}{e}$ یا $0/368$ یا تقریباً 37% مقدار اولیه خود کاهش می یابد (۴۳، ۴۵-۴۷). در چنین ضخامتی، اثربخشی حفاظتی سپر الکترومغناطیس برابر با $8/868$ دسی بل خواهد بود^{۱۲} (۴۴). بنابراین با توجه به اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه موجود در این مطالعه، مقدار عمق نفوذ این دسته از سپرها بیش تر از سپرهای تک لایه بوده و توانسته با افزایش انعکاس های متوالی، موجب کاهش اثربخشی حفاظتی آن ها در مقایسه با سپرهای تک لایه گردد. مقایسه اثربخشی حفاظتی سپر دو لایه $2-N2-N4$ (به عنوان نماینده سپرهای دو لایه که بیش ترین اثربخشی را در میان سپرهای دو لایه به دست آورد) با اثربخشی حفاظتی سپرالکترومغناطیس در عمق نفوذ که برابر با $8/868$ دسی بل است این موضوع را بیش از پیش روشن می نماید (جدول ۱). بنابراین می توان نتیجه گرفت که سپرهای دولایه هم جنس که در این پژوهش مورد مطالعه

۱۱ -Skin Depth

۱۲ - $SE(+dB) = 20 \log \frac{E_0}{E_t} = 20 \log \frac{1}{0.368} = 8.683$

۱۳ - Matching Layer

نتیجه گیری

نتایج مقایسه اثربخشی حفاظتی سپرهای تک لایه و دولایه موجود در این مطالعه نشان داد بر خلاف انتظار، نه تنها مقدار اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه بیش تر از اثربخشی حفاظتی سپرهای تک لایه ی نشد، بلکه دچار کاهش چشم گیر نیز شدند. اگرچه افزایش مدت زمان اختلاط موجب بهبود اثربخشی در هر دو نوع سپرهای تک و لایه گردید اما هم چنان میانگین اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه کم تر از سپرهای تک لایه بود و افزایش مدت زمان اختلاط نیز نتوانست ثمربخش باشد. هم چنین افزایش مدت زمان اختلاط در سپرهای دولایه نشان داد، در این سپرها با افزایش ضخامت، اثربخشی حفاظتی کاهش یافت. به نظر می رسد در این مطالعه استفاده از سپرهای هم جنس در تهیه سپرهای دولایه منجر به افزایش عمق نفوذ و انعکاس های متوالی و در نهایت کاهش چشم گیر اثربخشی حفاظتی در سپرهای دولایه شده باشد. پیشنهاد می گردد در پژوهش های آینده، سایر مطالعات در خصوص بهبود اثربخشی حفاظتی سپرهای دولایه هم جنس صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از بخشی از یک رساله دکتری در گروه مهندسی بهداشت حرفه ای دانش گاه تربیت مدرس می باشد. بدین وسیله از همکاری و مساعدت آزمایشگاه های بهداشت حرفه ای، پلیمر، اشعه ایکس دانش گاه تربیت مدرس و پژوهش گاه مخابرات و الکترونیک نصر تهران که ما را در به ثمر رسیدن این پژوهش یاری نمودند، کمال سپاس گزاری به عمل می آید.

جاذب^{۱۴} نام برده می شود (۱۶-۲۰). در مطالعات لیو و همکاران ضخامت مورد استفاده در لایه اول (لایه تطبیق) به عنوان عوامل تاثیرگذار دیگر بر اثربخشی حفاظتی جاذب های دو لایه گزارش شد. در مطالعه آنان حداکثر مقادیر اثربخشی جاذب دولایه به ترتیب در ضخامت های ۲/۹، ۲/۸، ۳/۱ و ۳/۳ میلی متر به دست آمد (۲۱).

همان طور که پیش از این ذکر شد در سپرهای دولایه گروه دوم، متغیر ضخامت عامل تضعیف کننده اثربخشی حفاظتی در این دسته از سپرها بود. با توجه به این که عمق نفوذ با پارامترهای نفوذپذیری مغناطیسی، ثابت دی الکتریک و رسانایی الکتریکی سپر، رابطه عکس دارد (معادلات ۲ و ۳) (۴۸) بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت در سپرهای دولایه مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی، ثابت دی الکتریک و رسانایی الکتریکی را در این سپرها کاهش داد که در نهایت موجب افزایش عمق نفوذ و تضعیف اثربخشی حفاظتی در این سپرها شده است (۲۳، ۴۴، ۴۸).

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

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

در اینجا δ ، σ ، ω ، ϵ ، μ ، α و F ، به ترتیب ضریب جذب، نفوذپذیری مغناطیسی (هنری بر متر)، ثابت دی الکتریک (فاراد بر متر)، رسانایی الکتریکی (زیمنس بر متر)، سرعت زاویه ای، فرکانس و عمق نفوذ می باشد.

REFERENCES

- Dehghani A, Ranjbarian M, Mohammadi A, Soleimanzade M, Ahangar Ad. Radiation Safety Awareness Amongst Staff And Patients In The Hos-pitals. *International Journal Of Occupational Hygiene*. 2014;6(3):114-9.
- Hazrati S, Sadeghi H, Amani M, Alizadeh B, Fakhimi H, Rahimzadeh S. Assessment Of Gamma Dose Rate In Indoor Environments In Selected Districts Of Ardabil Province, Northwestern Iran. *International Journal Of Occupational Hygiene*. 2010;2(1):42-5.
- Majidi F, Abedi K, Pirsaraei SRA. Occupational Exposure to Infrared Radiation in Aluminum and Cast-Iron Foundries in Zanjan, Iran. *International Journal of Occupational Hygiene* 2011;3(1):33-7.
- MADJIDI F. Application of a Model to Evaluate Infrared Exposure Limits in Aluminum Foundries Based on Threshold Temperature in the Range of 770-1400 nm. *International Journal of Occupational Hygiene* 2015. 2015;7(1):17-21.
- Golmohammadi R, Ebrahimi H, Fallahi M, Soltanzadeh A, Mousavi SS. An investigation of Extremely Low Frequency (ELF) Electromagnetic field emitted by common Laptops. *Journal of Health and Safety at Work*. 2014;4(1):11-20.
- Zaroushani V, Khavanin A, Jonidi Jafari A, Mortazavi SB. A New Microwave Shield Preparation for Super High Frequency Range: Occupational Approach to Radiation Protection. *Journal of Research in Health Sciences*. 2016;4(16):206-11.
- 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].
- Zaroushani. V, Khavanin. A, Jafari. AJ, Mortazavi. SB, Khajenasiri. F. Investigation of factors influencing the efficacy of electromagnetic shielding in X band frequency rang. *Journal of Health and Safety at Work* 2017;6(4).
- Qiu G, Wang Q, Nie M. Polypyrrole-Fe₃O₄ Magnetic Nanocomposite Prepared by Ultrasonic Irradiation. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2006;291(1):68-74.
- 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.
- 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.
- 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.
- Bayat M, Yang H, Ko FK, Michelson D, Mei A. Electromagnetic interference shielding effectiveness of hybrid multifunctional Fe₃O₄/carbon nanofiber composite. *Polymer*. 2014;55(3):936-43.
- Aphesteguy 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.
- 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.
- Shen G, Xu M, Xu Z. Double-layer microwave absorber based on ferrite and short carbon fiber composites. *Materials Chemistry and Physics*. 2007;105:268-72.
- Qiao M, Zhang C, Jia H. Synthesis and absorbing

- mechanism of two-layer microwave absorbers containing flocc-like nano-BaZn_{1.5}Co_{0.5}Fe₁₆O₂₇ and carbonyl iron. *Materials Chemistry and Physics*. 2012;135:604-9.
18. Meshram MR, Agrawal NK, Sinha B, Misra PS. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004;271:207-14.
 19. Das S, Nayak GC, Sahu SK, Routray PC, Roy AK, Baskey H. Microwave absorption properties of double-layer composites using CoZn/NiZn/MnZn-ferrite and titanium dioxide. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;377:111-6.
 20. 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.
 21. Liu Y, Liu X, Wang X. Double-layer microwave absorber based on CoFe₂O₄ ferrite and carbonyl iron composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;584:249-53.
 22. Meng W, Yuping D, Shunhua L, Xiaogang L, Zhijiang J. Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009;321(20): 3442-6.
 23. Zaroushani V, Khavanin A, Mortazavi SB, Jnonidi Jafari A. Improvement of electromagnetic shielding effectiveness for radar frequencies using dispersion factor. *Iran Occupational Health Journal*. 2016;13(1):1-10.
 24. Zaroushani V, Khavanin A, Mortazavi SB, Jonidi Jafari A. Efficacy of Net Epoxy Resin for Electromagnetic Shielding in X-Band Frequency Range. *Health Scope*. 2016;5(3):1-7.
 25. Zaroushani V, Khavanin A, Jonidi Jafari A, Mortazavi SB, Khajenasiri F. Investigation of factors influencing the efficacy of electromagnetic shielding in X band frequency range. *Journal of Health and Safety at Work*. 2016;6(4):1-16.
 26. Billmeyer FW. *Textbook of Polymer Science*. second ed: John Wiley and Sons; 1971.
 27. 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.
 28. Hemming LH. shielding theory. In: Shaw L, editor. *Architectural Electromagnetic Shielding Handbook-A Design and Specification Guide*-. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE); 1992. p. 13-34.
 29. Wang Y, Jing X. Intrinsically conducting polymers for electromagnetic interference shielding. *Polymers for Advanced Technologies*. 2005;16(4):344-51.
 30. Bonaldi RR, Siores E, Shah T. Characterization of electromagnetic shielding fabrics obtained from carbon nanotube composite coatings. *Synthetic Metals*. 2014;187:1- 8.
 31. Wu J, Ye Z, Ge H, Chen J, Liu W, Liu Z. Modified carbon fiber/magnetic graphene/epoxy composites with synergistic effect for electromagnetic interference shielding over broad frequency band. *Journal of colloid and interface science*. 2017;506:217-26.
 32. Jani RK, Patra MK, Saini L, Shukla A, Singh CP, Vadera SR. Tuning of Microwave Absorption Properties and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness of Nanosize Conducting Black-Silicone Rubber Composites over 8-18 GHz. *Progress in Electromagnetics Research M*. 2017;58.
 33. Wang Y, Luo F, Zhou W, Zhu D. Dielectric and electromagnetic wave absorbing properties of TiC/epoxy composites in the GHz range. *Ceramics International*. 2014;40(7, Part B):10749-54.
 34. Das S, Sahu S, Oraon R, Routray P, Baskey H, Nayak G. Reduced-graphene-oxide-and-strontium-titanate-based double-layered composite: an efficient microwave-absorbing material. *Bulletin*

- of Materials Science. 2017;40(2):301-6.
35. Zhang J, Xiao P, Zhou W, Hong W, Luo H. Preparation and microwave absorbing properties of carbon fibers/epoxy composites with grid structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2015;26(2):651-8.
 36. Shen G, Xu M, Xu Z. Double-layer microwave absorber based on ferrite and short carbon fiber composites. *Materials Chemistry and Physics*. 2007;105(2-3):268-72.
 37. Qiao M, Zhang C, Jia H. Synthesis and absorbing mechanism of two-layer microwave absorbers containing flocs-like nano-BaZn_{1.5}Co_{0.5}Fe₁₆O₂₇ and carbonyl iron. *Materials Chemistry and Physics*. 2012;135(2-3):604-9.
 38. Meshram MR, Agrawal NK, Sinha B, Misra PS. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004;271(23):207-14.
 39. Chung DDL. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*. 2001;39(2): 279-85.
 40. Huo J, Wang L, Yu H. Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption. *Journal of materials science*. 2009;44(15):3917-27.
 41. Geetha S, Satheesh 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.
 42. 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.
 43. Al-Saleh MH, Sundararaj U. Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites. *CARBON*. 2009;47:1738-46.
 44. Cheldavi A. Design and manufacture of electromagnetic shielding. Tehran: Iran University of Sciences and Technology [persian]; 2013.
 45. Carver GW. *Electromagnetic Wave Propagation*.
 46. 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.
 47. Bellucci S, Micciulla F. Nanostructured Polymer Coatings for Electronic Circuit Protection. *Rivista Italiana di Compositi e Nanotecnologie*. 2012;7(1).
 48. Mohammadi S. electromagnetic wave propagation. *Electromagnetic-2*. Tehran: Payam noor university; 2011[Persian]. p. 47-106.

Investigation on the effect of structural factors on shielding effectiveness in double-layer electromagnetic shields

Ali Khavanin¹, Ahmad Jonidi Jafari^{2,3}, Ali Safari Variani⁴, Vida Zaroushani^{5,6,*}

¹ Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³ Research Center for Environmental Health Technology, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

⁵ Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

⁶ Social Determinants of Health Research Center, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

Abstract

Introduction: Nowadays, demand for protection against radar radiation using electromagnetic shielding is on the rise. Double-layer or multilayer shielding were devised in order to improve the single layer electromagnetic shielding properties. In this study, we tried to prepare a new double-layers electromagnetic shield and investigate the effect of structural factors such as thickness, similarity in layers and mixing time on the shielding effectiveness for double-layers shields.

Material and Method: This study used the Resin Epoxy EI-403 and Nickel Oxide nanoparticles to prepare single layer shields by casting method (with two different mixing time: 10 and 66 min) in 2, 4 and 6 mm thicknesses and 7 wt% Nickel oxide nanoparticles. Then, in order to prepare double-layers shields, single-layer shields were placed on each other without air space. Scattering parameters were measured by a Vector Network Analyzer (V.N.A) and shielding effectiveness were calculated in X-band radar frequency range.

Result: The highest and the lowest averages of shielding effectiveness in single layer shields were 84.14% and 46.05%, respectively. These values were 66.34% and 41.99 %, in double layers electromagnetic shields. The averages of shielding effectiveness values in the double-layers shields (with 10 min in mixing time) in 6, 8 and 10 mm in thickness were 41.99%, 45.45% and 43.25%, respectively. These values in 66 min in mixing time, increased to 54.30%, 62.07% and 66.34%, respectively.

Conclusion: In this study, the shielding effectiveness in double-layers were less than single layer electromagnetic shields. Although the increase in mixing time improved the shielding effectiveness of both single and double layer shields, it could not increase the shielding effectiveness in double layer shields in comparison with single layer. Also, the increase in mixing time in double-layer shields showed that shielding effectiveness decreased with increasing thickness in these shields. Also, it was seen that using a similar single-layer shield in the structural of a double-layer shield led to an increase in skin depth and multi reflections. It finally reduced the shielding efficiency in double layer. It is suggested that in the future, other studies be conduct to improve the shielding effectiveness in these electromagnetic shields.

Key words: Single Layer Electromagnetic Shield, Double Layer Electromagnetic Shield, Radar Radiation, Shielding Effectiveness

* Corresponding Author Email: v.zaroushani@qums.ac.ir