



Flexible Multicomponent Nanocomposite Cover for Efficient Absorption of Electromagnetic Waves

Ali Rashidi ¹, Gholamreza Kiani ^{2*}, Ayub Karimzad Ghavidel ³, Mahsa Mahdavinia ⁴

¹ M. Sc., Department of Nanotechnology Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, East Azerbaijan, Iran

² Associate Professor, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, East Azerbaijan, Iran

³ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Tehran, Iran

⁴ Ph. D. Student, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, East Azerbaijan, Iran

*Corresponding Author's Email: g.kiani@tabrizu.ac.ir (Gh. Kiani)

Paper History:

Received: 2022-02-14

Revised in revised form: 2022-03-26

Scientific Accepted: 2022-04-26

Keywords:

Electromagnetic Wave Absorber,
Multicomponent Nanocomposite,
Polyaniline,
Nickel Nanowires,
Carbon Nanotubes

Abstract The main objective of this research was to fabricate a flexible Multi-component Nanocomposite (MN) cover with high efficiency to absorb Electro-Magnetic Waves (EMW). For this purpose, nine MNs containing Carbon Nanotubes (CNTs), core-shell structure of Polyaniline-Fe₃O₄ (PANI), and Nickel Nanowires (NiNW) were prepared with different weight percentages of 2, 4, and 6 with the thickness of 2 mm within the waterborne polyacrylic. Then, their structural characteristics were investigated through Field-Emission Electron Microscopy (FE-SEM). The protection value of the covers against EMW were measured using a Vector Network Analyzer (VNA) machine at the frequency range of 8-12 GHz. The results revealed that followed by an increase in the concentration of the fillers, they formed a dense and conductive network within the matrix, thus leading to more interaction by EMW and eventually more absorption. The simultaneous presence of all three of EMW absorption enhancers including CNTs, PANI, and NiNW offered a more effective shielding than that in both single and double components by improving the matrix electrical and magnetic conductivity. Finally, the evaluations proved that the nanocomposite containing the mentioned three fillers with the weight percentage of 6 wt % and effective shielding of 22 dB exhibited the most ideal performance between other nanocomposites over the X-frequency range.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.329382.1216>

URL: https://www.jamt.ir/article_164803.html

1. INTRODUCTION

The electromagnetic radiation emitted by the electronic devices causes an increase in the magnetic pollution which in turn has adverse effects on the electronic systems and human health [1, 2]. Effective shielding covers are one of the well-known methods for reducing the unfavorable impacts of this radiation that are also regarded as an efficient method for suppressing the radiation of electromagnetic waves and protecting the equipment [3]. Great interests have been taken in the polymeric nanocomposites due to their significant efficiency in shielding against the electromagnetic radiations. Carbon nanotubes are known as the conductive fillers that are widely applied due to their high surface-to-volume ratio, very low permeability, unique electrical conductivity, and low mass density [4]. In addition to the carbon nanotubes, some other materials such as polyaniline, iron oxide, and nickel can be used for the fabrication of the electromagnetic wave shields owing to their high conductivity and suitable magnetic properties [5, 6]. Many research studies have been conducted to develop a method and find the suitable materials for preparing an effective electromagnetic shield [7, 8]. To the best of our knowledge, the effect of the application of

multicomponent fillers on the function of the electromagnetic properties of flexible nanocomposites has rarely been investigated. In this regard, the present research aims to propose a method for producing nature-friendly multi-component flexible, low thickness, and high efficiency electromagnetic shields. To this end, a multi-component nanocomposite consisting of carbon nanotubes, nickel nanowires, and polyaniline core-shell nano-structure with iron oxide within the flexible waterborne polyacrylic matrix was prepared with different concentrations. In this regard, attempts were made to investigate the effects of each component of the nanocomposite as well as their combination on the overall effective shielding, absorption characteristics, and reflection of waves in the frequency range of 8-12 GHz.

2. MATERIALS AND METHODS

In order to prepare the polyaniline-Fe₃O₄ core-shell structure, in-situ synthesis [9] was taken into consideration. Nickel nanowires were synthesized based on the method proposed in [10]. To achieve a high dispersion degree and reduce the re-agglomerates, the carbon nanotubes were functionalized [11]. To fabricate the nanocomposites, first, 2 mL of 50 % waterborne

Please cite this article as: Rashidi, A., Kiani, Gh., Karimzad Ghavidel, A., Mahdavinia, M., "Flexible multicomponent nanocomposite cover for efficient absorption of electromagnetic waves", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 11, No. 2, (2022), 27-43. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.329382.1216>).



polyacrylic with 6 mL of distilled water (with a ratio of 1:3) was diluted. The low viscosity of the matrix facilitates the efficiency enhancement in the function of ultrasonic waves in both spreading and dispersing of nanoparticles. Next, the nanomaterials with different weight percentages were added to the prepared matrix. Then, the suspensions were sonicated for 10 minutes at

the power of 50 watts. The obtained mixtures were individually poured into a silicone mold with the dimensions of $22.8 \times 10.1 \times 2$ mm. The samples were then kept at the ambient temperature for 12 hours to dry completely. The shielding performance of the samples were measured by a VNA machine in the frequency range of 8-12 GHz.

Table 1. Nanocomposite shields prepared with different concentrations and compositions

Number of filler components	Nanocomposite covers	MWCNT (W%)	NiNW (W%)	Fe ₃ O ₄ -PANI (W%)
Single component	No. 1	6 %	–	–
	No. 2	–	6 %	–
	No. 3	–	–	6 %
Duple component	No. 4	6 %	6 %	–
	No. 5	–	6 %	6 %
	No. 6	6 %	–	6 %
Three components	No. 7	2 %	2 %	2 %
	No. 8	4 %	4 %	4 %
	No. 9	6 %	6 %	6 %

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 individually demonstrates the shielding components of each prepared specimens including absorption loss, reflection loss, and total shielding (EMI SE). This figure makes a comparison of the obtained results and according to the results, nanocomposite No. 9 exhibited the best performance with the highest total effective shielding value equal to 22 dB. High weight percentage of the fillers within this sample increases the probability of electromagnetic waves interacting with the conductive fragment, thus enhancing the EMI SE [11]. Moreover, formation of the conductive network by

carbon nanotubes and nickel nanowires in higher concentrations is another reason based on which we can justify our findings. Obviously, a decrease in the concentration would reduce the interaction of electromagnetic waves with conductive fragments, hence a reduction in the effectiveness of EMI SE. Introduction of any further individual filler could not enhance the shielding as much as addition of multicomponent composition could do. In summary, it can be concluded that application of only single-component nanoparticle materials such as iron oxide and nickel nanowires cannot provide the desired shielding against electromagnetic waves [12-14].

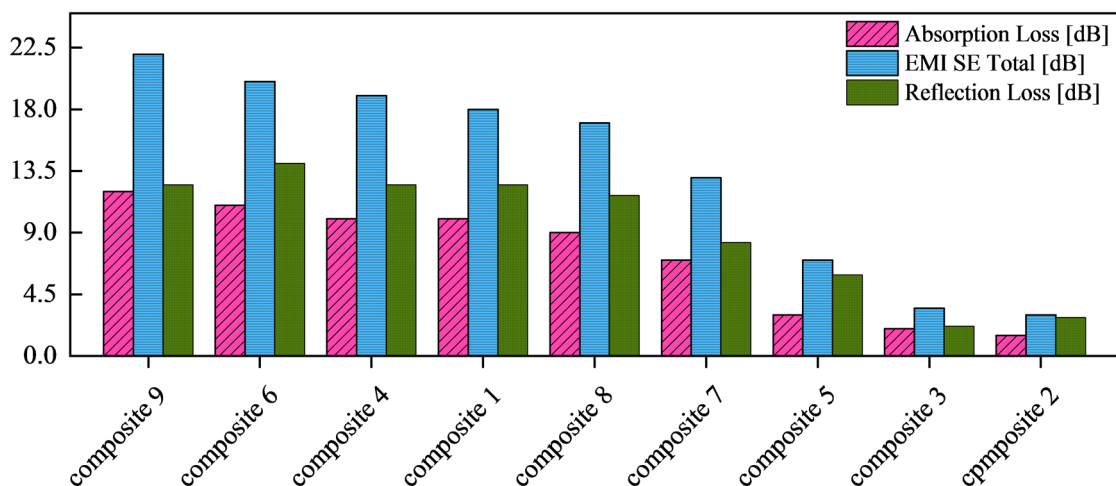


Figure 1. Individual the shielding components of each prepared specimens

4. CONCLUSION

In this research, the flexible and effective electromagnetic shields were fabricated using a single- and multi-component fillers. The evaluations showed that the simultaneous addition of 6 % of three fillers, i.e., carbon nanotubes, nickel nanowires, and Fe₃O₄-PANI, could increase the total shielding up to 22 dB. This achievement was attributed to an increase in the effective interaction between the electromagnetic waves

and nanoparticles and formation of a conductive network by nanotubes and wires.

5. ACKNOWLEDGEMENT

We thank Antenna Laboratory of Khajeh Nasir Toosi University for their cooperation in measuring the electromagnetic characteristics of the samples.

REFERENCES

1. Zhang, N., Wang, Z., Song, R., Wang, Q., Chen, H., Zhang, B., Lv, H., Wu, Z., He, D., "Flexible and transparent graphene/silver-nanowires composite film for high electromagnetic interference shielding effectiveness", *Science Bulletin*, Vol. 64, No. 8, (2019), 540-546. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.03.028>
2. Zhu, X., Xu, J., Qin, F., Yan, Z., Guo, A., Kan, C., "Highly efficient and stable transparent electromagnetic interference shielding films based on silver nanowires", *Nanoscale*, Vol. 12, No. 27, (2020), 14589-14597. <https://doi.org/10.1039/D0NR03790G>
3. Palanisamy, S., Tunakova, V., Hu, Sh., Yang, T., Kremenakova, D., Venkataraman, M., Petru, M., Militky, J., "Electromagnetic interference shielding of metal coated ultrathin nonwoven fabrics and their factorial design", *Polymers*, Vol. 13, No. 4, (2021), 484. <https://doi.org/10.3390/polym13040484>
4. Shayesteh Zeraati, A., Mende Anjaneyalu, A., Pawar, S. P., Abouelmagd, A., Sundararaj, U., "Effect of secondary filler properties and geometry on the electrical, dielectric, and electromagnetic interference shielding properties of carbon nanotubes/polyvinylidene fluoride nanocomposites", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 61, No. 4, (2021), 959-970. <https://doi.org/10.1002/pen.25591>
5. Liu, Y., Song, D., Wu, C., Leng, J., "EMI shielding performance of nanocomposites with MWCNTs, nanosized Fe₃O₄ and Fe", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 63, No. 0, (2014), 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.014>
6. Al-Saleh, M. H., Saadeh, W. H., Sundararaj, U., "EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric", *Carbon*, Vol. 60, No. 0, (2013), 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.008>
7. Arjmand, M., *Electromagnetic interference shielding and dielectric properties of multi-walled carbon nanotube/polymer composites*, Doctoral dissertation, Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, (2014). Available at: <http://hdl.handle.net/11023/1379>
8. Arjmand, M., Apperley, T., Okoniewski, M., Sundararaj U., "Comparative study of electromagnetic interference shielding properties of injection molded versus compression molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites", *Carbon*, Vol. 50, No. 14, (2012), 5126-5134. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.06.053>
9. Han, X., Gai, L., Jiang, H., Zhao, L., Liu, H., Zhang, W., "Core-shell structured Fe₃O₄/PANI microspheres and their Cr (VI) ion removal properties", *Synthetic Metals*, Vol. 171, No. 0, (2013), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.02.025>
10. Kong, Y. Y., Pang, S. C., Chin, S. F., "Facile synthesis of nickel nanowires with controllable morphology", *Materials Letters*, Vol. 142, No. 0, (2015), 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.140>
11. Zadehnajar, P., Karbasi, S., Akbari, B., Mirmusavi, M. H., "Evaluation of physical and mechanical properties of electrospinning nanocomposite scaffolds poly ε-caprolactone-gelatin/multi walled carbon nanotube", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 7, No. 4, (2019), 93-100. <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.84403>
12. Al-Saleh, M. H., Sundararaj, U., "Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/Polymer composites directional electromagnetic interference shielding based on step-wise asymmetric conductive networks", *Carbon*, Vol. 47, No. 7, (2009), 1738-1746. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.02.030>
13. Wanasinghe, D., Aslani, F., Ma, G., Habibi, D., "Review of polymer composites with diverse nanofillers for electromagnetic interference shielding", *Nanomaterials*, Vol. 10, No. 3, (2020), 541. <https://doi.org/10.3390/nano10030541>
14. Zhang, F., Jia, Z., Wang, Z., Zhang, C., Wang, B., Xu, B., Liu, X., Wu, G., "Tailoring nanoparticles composites derived from metal-organic framework as electromagnetic wave absorber", *Materials Today Physics*, Vol. 20, No. 0, (2021), 100475. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100475>



مقاله کامل پژوهشی

پوشش نانوکامپوزیتی چندجزیی منعطف برای جذب مؤثر امواج الکترومغناطیسی

علی رشیدی^۱، غلامرضا کیانی^{۲*}، ایوب کریم‌زاد قویدل^۳، مهسا مهدوی‌نیا^۴

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نانوفناوری، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

^۲ دانشیار، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

^۳ مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، تهران، ایران

^۴ دانشجوی دکتری، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶

پذیرش علمی: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

کلیدواژه‌ها:

عایق منعطف امواج الکترومغناطیس،

نانوکامپوزیت چندجزیی،

پلی‌آنیلین،

نانوسیم‌های نیکل،

نانولوله‌های کربنی

چکیده هدف از این پژوهش، ساخت پوشش نانوکامپوزیتی منعطف چندجزیی و با کارایی بالا جهت جذب امواج الکترومغناطیس است. نمونه‌های نانوکامپوزیتی چندجزیی شامل: نانولوله‌های کربنی، ساختار هسته-پوسته پلی‌آنیلین-اکسید آهن و نانوسیم‌های نیکل، با درصدهای وزنی ۲، ۴ و ۶ درصد در زمینه پلی‌آکرلیک پایه آبی در ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شد و مشخصات ساختاری آن‌ها، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی بررسی شد. مقدار عایق‌سازی پوشش‌ها در برابر امواج الکترومغناطیس، توسط دستگاه تحلیلگر شبکه برداری در محدوده بسامدی ۸-۱۲ گیگاهرتز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت پرکننده‌ها، شبکه متراکم رسانا از آن‌ها در زمینه شکل می‌گیرد که موجب برهم‌کنش بیشتر با امواج الکترومغناطیس شده و در نهایت جذب بیشتر می‌شود. حضور هم‌زمان هر سه عامل تقویت‌کننده جذب امواج شامل: نانولوله‌های کربنی، پلی‌آنیلین-اکسید آهن و نانوسیم‌های نیکل به ترتیب با بهبود هدایت الکتریکی و مغناطیسی زمینه، میزان عایق‌سازی مؤثر بزرگ‌تری را در مقایسه با حالت‌های تک و یا دوجزیی ارایه کردند. در نهایت، ارزیابی‌ها مشخص نمود که نانوکامپوزیت متشکل از هر سه پرکننده با ۶ درصد وزنی، با عایق‌سازی مؤثر ۲۲ دسیبل، ایده‌آل‌ترین عملکرد را در محدوده بسامدی X در مقایسه با سایر نانوکامپوزیت‌ها دارد.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2022.329382.1216> URL: https://www.jamt.ir/article_164803.html

۱- مقدمه

دستگاه‌های الکترونیکی و سلامت انسان‌ها می‌گذارد [۲ و ۴]. زمانی که سیگنال‌های ساطع شده از یک دستگاه باعث اختلال در عملکرد سایر دستگاه‌های الکترونیکی شود، موجب بروز تداخل الکترومغناطیسی^۱ می‌شود [۵]. با توسعه محصولات الکترونیکی، سازگاری الکترومغناطیسی بین قطعات الکترونیکی با بسامد^۲ کاری بالا، به‌عنوان چالش اساسی مطرح شده است [۳]. یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل، استفاده از پوشش‌های محافظتی است که روشی کارآمد، در سرکوب تشعشعات امواج الکترومغناطیس و حفاظت از تجهیزات بشمار می‌رود و در سالیان گذشته

طیف امواج الکترومغناطیس، محدوده وسیعی از تجهیزات در حوزه‌هایی همچون الکترونیک، زیست‌پزشکی، صنایع نظامی، رادارها، تلفن‌های همراه و ... را شامل می‌شود [۳-۱]. با روند روبه‌رشد فناوری و عصر ارتباطات و استفاده گسترده از ابزارهای الکترونیکی و دستگاه‌های مخابراتی، تشعشعات الکترومغناطیسی ساطع شده از این دستگاه‌ها، موجب افزایش آلودگی‌های مغناطیسی شده و اثرات نامطلوبی بر

¹ Electromagnetic Interference

² Frequence

*عهده دار مکاتبات: غلامرضا کیانی

نشانی: ایران، آذربایجان شرقی، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده شیمی، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، تلفن: ۰۴۱-۳۳۳۲۶۷۱۱-۰۴۱، دورنگار: ۰۴۱-۳۳۳۴۰۱۹۱

پیام‌نگار: g.kiani@tabrizu.ac.ir

۱/۵ میلی‌متر تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که کامپوزیت حاوی ۱۰ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، عایق-سازی کارآمد ۲۶ دسیبل (dB) را در محدوده بسامدی X ارائه می‌دهد. در تحقیق دیگری، یک کامپوزیت با ساختار لایه‌ای از پلی‌آنیلین و نانوسیم‌های نقره^{۱۵} (AgNW) به ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شد که قادر به عایق‌سازی کارآمد ۴۸ دسیبل بود [۲۰]. در یک بررسی دیگر، کامپوزیتی با ساختار شبکه‌ای شکل از نیکل بر روی پلی‌اتیلن با ۲ درصد حجمی ایجاد شد که عایق‌سازی کارآمد ۵۵ دسیبل را در برابر امواج الکترومغناطیس نشان داد [۱۷]. در یک پژوهش دیگر که توسط موثق^{۱۶} و همکارانش [۲۱] انجام شد، پوشش نانوکامپوزیتی در ضخامت ۳ میلی‌متر، با ۵ درصد وزنی از نانوذرات Fe₃O₄ و پلی‌آنیلین به‌عنوان پرکننده، در زمینه اپوکسی تهیه شد که کامپوزیت مذکور توانست عایق-سازی کارآمد ۲۹ دسیبل را ارائه دهد. یک گروه تحقیقاتی، کامپوزیت‌هایی از پلی‌استایرن^{۱۷} (PS) و اکسیدگرافن احیاشده^{۱۸} (rGO) و نانوذرات Fe₃O₄ با درصدهای وزنی متفاوت تهیه کردند که ارزیابی‌های انجام‌شده بر روی این کامپوزیت‌ها نشان داد که نمونه حاوی ۲ درصد وزنی از نانوذرات Fe₃O₄، با میزان عایق‌سازی ۳۰ دسیبل، بهترین عملکرد را داشته است [۲۲]. همچنین محققین موفق به طراحی ساختاری متشکل از هسته‌های هیبریدی مغناطیسی rGO/Fe₃O₄/CNT شدند که عایق‌سازی کارآمد کلی ۴۳/۵ دسیبل را عرضه کرد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که بارگیری ساختار Fe₃O₄ با تخلخل بالا، نه تنها می‌تواند چگالی را کاهش دهد، بلکه مسیر انتقال را نیز تا حد زیادی طولانی می‌کند و بازتاب چندگانه در بین دیواره‌های سلولی را افزایش داده و توانایی محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی را بهبود می‌بخشد [۲۳].

توجهات زیادی را به خود معطوف کرده است [۶]. فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم از جمله موادی هستند که به‌طور رایج در تولید روکش‌های الکترومغناطیس استفاده می‌شوند. معایبی مانند عدم انعطاف‌پذیری مکانیکی، وزن زیاد و مقاومت کم در برابر خوردگی از جمله محدودیت‌های کاربردی این عایق‌ها محسوب می‌شوند [۲].

فناوری جذب امواج الکترومغناطیس در ناحیه میکروموج^۱ برای مقاصد تجاری، نظامی، وسایل ارتباطی و الکترونیکی، موضوع ارزشمندی در مقطع کنونی است [۷]. از این رو، نانوکامپوزیت‌های پلیمری رسانا^۲ (CPC) به دلیل مزایایی همچون وزن سبک، هزینه کم، مقاومت در برابر خوردگی و انعطاف‌پذیری می‌توانند نقایص عایق‌های فلزی^۳ را جبران کنند [۸ و ۹].

نانوکامپوزیت‌های پلیمری، رایج‌ترین دسته از کامپوزیت‌ها هستند که کارایی آن‌ها توسط خواص اجزای سازنده‌شان تعیین می‌شود. نانولوله‌های کربنی^۴ (CNT) [۱۰]، نانوالیاف کربنی^۵ [۱۱]، کربن سیاه^۶ [۱۲]، گرافن^۷ [۱۳] و پرکننده‌های^۸ فلزی در مقیاس نانو [۱۴]، از جمله پرکننده‌هایی هستند که در تولید پوشش‌های محافظ امواج الکترومغناطیس^۹ (EMI) به‌کار می‌روند. در این بین، نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، نفوذپذیری بسیار کم، هدایت الکتریکی^{۱۰} بی‌نظیر و چگالی جرمی^{۱۱} ناچیز، به‌عنوان پرکننده رسانا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۵]. در کنار نانولوله‌های کربنی، موادی نظیر پلی-آنیلین^{۱۲} (PANI)، اکسید آهن و نیکل به‌علت رسانایی بالا و خواص مغناطیسی مناسب، در پوشش‌های عایق امواج الکترومغناطیس قابل استفاده‌اند [۱۶-۱۸].

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تهیه پوشش‌های محافظ امواج الکترومغناطیس صورت گرفته است [۵ و ۸]. لی^{۱۳} و همکارانش [۱۹]، کامپوزیتی از نانولوله‌های کربنی چنددیواره و پلی‌آکریلات^{۱۴} با درصدهای وزنی ۰ تا ۱۰ درصد در ضخامت

¹⁰ Electrical Conductivity

¹¹ Mass Density

¹² Polyaniline

¹³ Yong Li

¹⁴ Polyacrylate

¹⁵ Silver Nanowire

¹⁶ Movassagh

¹⁷ Polystyrene

¹⁸ Reduced Graphene Oxide

¹ Microwave

² Conductive Polymer Composite

³ Metal Insulation

⁴ Carbon Nanotubes

⁵ Carbon Nanofibers

⁶ Carbon Black

⁷ Graphen

⁸ Filler

⁹ Electromagnetic Interference Shielding

برای شکل‌دهی نمونه‌ها نیز قالبی از جنس سیلیکون تهیه شد. عملکرد پوشش نانوکامپوزیت‌ها در برابر امواج الکترومغناطیس توسط دستگاه VNA مدل HP 8510 ساخت کشور آمریکا (مستقر در آزمایشگاه آنتن دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی) در محدوده X-band و در بازه بسامدی ۸-۱۲ گیگاهرتز بررسی شد. همچنین تحقیق درباره ریخت-شناسی و ساختار پوشش‌های نانوکامپوزیتی با بکارگیری دستگاه‌های FE-SEM^۸ مدل TESCAN MIRA3 انجام شد.

۲-۲- سنتز و آماده‌سازی مواد

یکی از روش‌های مرسوم برای جلوگیری از تجمع نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن^۹ (Fe₃O₄)، استفاده از سنتز درجا^{۱۰} به همراه پلی‌آنیلین است. برای سنتز پلی‌آنیلین، ابتدا خالص‌سازی مونومر آنیلین با استفاده از فرایند تقطیر، در ۴ مرحله صورت گرفت. سپس رقیق‌سازی ۳/۵۲ میلی‌لیتر از اسید هیدروکلریک، با آب مقطر انجام شد. پس از عمل رقیق کردن، محلولی با حجم ۲۵ میلی‌لیتر به دست آمد. در مرحله بعد، نیمی از اسید هیدروکلریک رقیق‌شده، معادل ۱۲/۵ میلی‌لیتر با ۲/۲۸ گرم آمونیوم پرسولفات ترکیب و توسط همزن مغناطیسی هم‌زده شد. در ادامه، ۱ میلی‌لیتر مونومر آنیلین به همراه ۱۲/۵ میلی‌لیتر از اسید هیدروکلریک باقی‌مانده، ترکیب شد و در داخل حمام یخ، تحت هم‌زدن قرار گرفت. محلول حاوی اسید هیدروکلریک و آمونیوم پرسولفات، توسط قیف دکانتور به صورت آهسته و قطره‌قطره در مدت زمان تقریبی ۱ ساعت، به درون محلول حاوی اسید هیدروکلریک/آنیلین ریخته شد. در پایان، محلول با رنگ سبزه تیره نمایان شد که نشان‌دهنده تشکیل پلی‌آنیلین می‌باشد. به منظور تهیه ساختار هسته-پوسته و پایدارسازی محیطی Fe₃O₄، ابتدا ۱ گرم از این نانوذرات به درون ۱۲/۵ میلی‌لیتر محلول حاوی اسید هیدروکلریک/آنیلین ریخته شد و به مدت ۴ دقیقه تحت اولتراسونیک با توان ۵۰ وات قرار گرفت تا به طور یکنواخت پخش و پراکنده شود. در ادامه، همان ترتیب ساختار هسته-پوسته نیز با روندی مشابه تولید شد [۲۴ و ۲۵].

بر اساس بررسی‌های دقیق انجام‌شده، تأثیر پرکننده‌های چندجزیی^۱ بر خصوصیات الکترومغناطیس کامپوزیت‌های منعطف، به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، تولید عایق‌های الکترومغناطیسی منعطف چندجزیی طبیعت‌دوست با راندمان بالای جذب و با ضخامت کم است. برای این منظور نانوکامپوزیت چندجزیی متشکل از نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های نیکل^۲ (NiNW) و نانوذرات با ساختار هسته-پوسته^۳ پلی‌آنیلین با اکسید آهن در زمینه منعطف پلی-آکرلیک پایه آبی^۴ تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا تمرکز اصلی، بررسی تأثیر نقش هر یک از اجزای نانوکامپوزیت و تأثیر ترکیب آن‌ها بر میزان عایق‌سازی کارآمد کلی، خصوصیات جذب و همچنین انعکاس امواج در محدوده بسامدی ۸-۱۲ گیگاهرتز برای مقاصد جذب راداری بود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

در این تحقیق جهت سنتز پلی‌آنیلین از مونومر آنیلین، اسید هیدروکلریک ۳۷ درصد و آمونیوم پرسولفات^۵ ساخت شرکت Scharlau اسپانیا استفاده شد. از هیدرازین هیدرات و نیکل کلرید ساخت شرکت مرک آلمان و اتیلن گلیکول ساخت شرکت مجلی، جهت سنتز نانوسیم‌های نیکل استفاده شد. اکسید آهن (III) ساخت شرکت مرک آلمان و نانولوله کربنی چند-دیواره^۶ (MWCNT) ساخت Nanocyl-NC7000 بلژیک، به عنوان پرکننده در پوشش نانوکامپوزیتی به کار گرفته شد. به منظور عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی از اسید نیتریک^{۶۷} درصد و اسید سولفوریک ۹۸ درصد ساخت کارخانه Scharlau اسپانیا استفاده شد. با توجه به هدف این پژوهش که تولید پوشش جاذب امواج الکترومغناطیسی منعطف است، پلی‌آکرلیک پایه آبی تولیدشده در شرکت سیماب زرین ایران، به عنوان زمینه^۷ پوشش نانوکامپوزیت در نظر گرفته شد. این پلیمر علاوه بر برآورده کردن هدف اصلی تحقیق، ارزان‌قیمت بوده که خود مزیتی برجسته در راستای تجاری‌سازی یافته‌ها به‌شمار می‌رود.

⁶ Multi Wall Carbon Nanotub

⁷ Matrix

⁸ Field Emission Scanning Electron Microscope

⁹ Iron (III) Oxide

¹⁰ In Situ

¹ Multi-Component

² Nickel Nanowire

³ Core-Shell

⁴ Water-Based Polyacrylic

⁵ Ammonium Persulfate

به منظور ساخت پوشش‌های نانوکامپوزیتی، ابتدا ۲ میلی-لیتر پلی‌آکرلیک پایه آبی ۵۰ درصد به همراه ۶ میلی‌لیتر آب مقطر (با نسبت ۱ به ۳) مخلوط شد. این نسبت جهت رقیق کردن ماتریس زمینه (برای افزایش راندمان عملکرد امواج اولتراسونیک در پخش و پراکنده کردن نانوذرات) توسط آزمایش‌های اکتشافی تعیین شد. در ادامه، نانومواد با درصد‌های وزنی مختلف به ساختار زمینه پلی‌آکرلیک رقیق‌شده با آب مقطر، اضافه شد. پخش و پراکنده‌سازی نانوذرات در زمینه، توسط دستگاه اولتراسونیک پروب ساخت شرکت توسعه فناوری امواج مافوق صوت به مدت ۱۰ دقیقه با توان ۵۰ وات انجام شد. محصول این فرایند که مخلوطی از نانوذرات در ماتریس زمینه بود، در داخل یک قالب سیلیکونی به ابعاد $10/1 \times 22/8$ میلی‌متر ریخته شد. پس از تبخیر کامل آب و خشک شدن نمونه بعد از ۱۲ ساعت در دمای محیط، دوباره مخلوط با همان مشخصات قبلی تهیه و بر روی نمونه قبلی ریخته شد و تا زمان دستیابی به ضخامت تقریبی ۲ میلی‌متر، این عملیات تکرار شد. این نکته پیش از این در مراجع معتبر علمی به اثبات رسیده است که در غلظت‌های بالای پرکننده‌ها، در محدوده بسامدی X، در ضخامت تقریبی ۲ میلی‌متر، عایق‌سازی در برابر امواج الکترومغناطیس به میزان قابل توجهی می‌رسد [۵ و ۳۰]؛ بنابراین از بررسی اثر ضخامت صرف نظر شده است. روند فوق برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها با اجزا و درصد‌های مختلف پیگیری شد. در مجموع ۹ پوشش کامپوزیتی به ابعاد حفره‌های قالب سیلیکونی و ضخامت ۲ میلی‌متر با مشخصات مندرج در جدول (۱) تهیه شد. در این جدول درصد حضور نانوذرات و مشخصات هر نانوکامپوزیت ذکر شده است.

به منظور سنتز نانوسیم‌های نیکل، نخست مقدار ۰/۱۷ گرم نیکل کلرید در ۷۵ میلی‌لیتر اتیلن‌گلیکول ریخته شد. سپس دمای مخلوط حاصل، تحت هم‌زدن تا ۱۲۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد تا نیکل کلرید به‌طور کامل در اتیلن‌گلیکول حل شود. پس از رسیدن دما به ۱۲۰ درجه سلسیوس، هیدرازین هیدرات با حجم ۱۰ میلی‌لیتر، قطره‌قطره به محلول اضافه شد و روند حرارت‌دهی متوقف گردید و اجازه داده شد تا محلول در دمای محیط سرد شود. توضیح این‌که به محض افزودن هیدرازین هیدرات، محلول به رنگ سیاه تبدیل شده و حباب‌هایی از درون محلول به سطح آن حرکت می‌کند که نشان‌دهنده شکل‌گیری نانوسیم‌های نیکل است [۲۶]. پس از گذشت مدت زمان ۲۰ دقیقه، نانوسیم‌های نیکل در روی سطح محلول شناور شد که پس از جداسازی آن‌ها توسط سانتریفیوژ، با اتانول و آب مقطر در چندین مرحله شستشو داده شد. محصول بدست‌آمده در داخل کوره با دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد تا به‌طور کامل خشک شود [۲۷].

عامل دار^۱ کردن نانولوله کربنی، با هدف پخش مناسب آن، در داخل محیط‌های قطبی نظیر آب و پلیمرهای پایه آبی مانند پلی‌آکرلیک انجام شد [۲۸]. برای این منظور، ابتدا ۲۴۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک با ۸۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک مخلوط شد. در ادامه، ۱ گرم نانولوله کربنی به محلول فوق اضافه گردید و دمای آن در حال هم‌زدن بر روی همزن مغناطیسی، به ۷۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد و به مدت ۳ ساعت حین هم‌زدن، در این دما نگهداری شد. پس از پایان این مدت، جداسازی نانولوله‌های کربنی توسط سانتریفیوژ دور بالا انجام شد و شستشو با اتانول و آب مقطر تا آنجایی ادامه پیدا کرد که pH محلول به ۵/۵ برسد [۲۹].

جدول ۱. پوشش‌های نانوکامپوزیتی تهیه‌شده با غلظت‌ها و ترکیب‌های متفاوت

تعداد اجزای پرکننده	پوشش نانوکامپوزیتی	درصد وزنی نانولوله کربنی	درصد وزنی نانوسیم نیکل	درصد وزنی Fe ₃ O ₄ -PANI
تک‌جزیی	شماره ۱	۶ درصد	—	—
	شماره ۲	—	۶ درصد	—
	شماره ۳	—	—	۶ درصد
دوجزیی	شماره ۴	۶ درصد	۶ درصد	—
	شماره ۵	—	۶ درصد	۶ درصد

¹ Functionalization

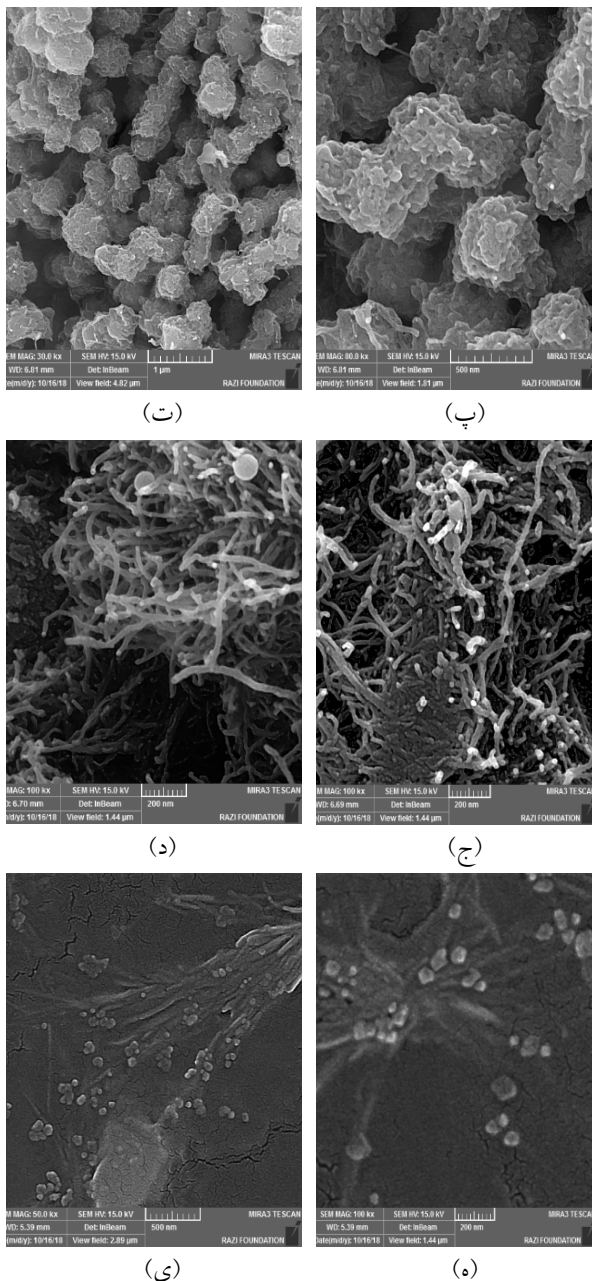
شماره ۶	۶ درصد	—	۶ درصد
شماره ۷	۲ درصد	۲ درصد	۲ درصد
شماره ۸	۴ درصد	۴ درصد	۴ درصد
شماره ۹	۶ درصد	۶ درصد	۶ درصد

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریخت‌شناسی نانومواد و ساختار پوشش

نانوکامپوزیتی

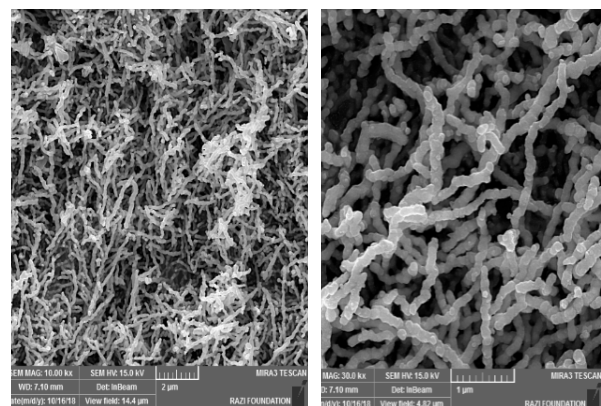
شکل ۱، تعدادی از میکروگراف‌های به‌دست‌آمده از بررسی نمونه‌ها و مواد سنتز شده توسط FE-SEM، را نشان می‌دهد. تصویر میکروسکوپی نانوسیم‌های نیکل سنتز شده در شکل (الف) و (ب-۱) نشان می‌دهد که نانوسیم‌ها با توزیع اندازه بسیار مناسب و قطرهای ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر بدست آمده‌اند. در شکل (ب-۱) و (ت-۱) که نشان‌دهنده میکروگراف ساختار هسته-پوسته Fe_3O_4 -PANI است، نانوذرات Fe_3O_4 توسط پلی-آنیلین به‌خوبی پوشش داده شده‌اند و ساختار هسته-پوسته شکل گرفته است. شکل (ج-۱) و (د-۱) نیز تصاویر نانولوله‌های کربنی پس از فرایند عامل‌دار شدن را نشان می‌دهند. براساس این شکل، فرایند عامل‌دار کردن توسط محیط‌های اسیدی مشروح در قسمت مواد و روش‌ها، بر روی ساختار اولیه نانولوله‌ها اثر نامطلوبی نداشته و شکل ظاهری آن‌ها حفظ شده است. در ارزیابی کلی ساختار نانوکامپوزیت‌ها توسط FE-SEM، مشخص شد که نانوذرات با پخش مطلوب در زمینه، ساختار مناسبی را ایجاد کرده‌اند؛ البته در درصد‌های وزنی ۴ و ۶ درصد، نقاط کلوخه‌ای نیز مشاهده می‌شوند.



شکل ۱. تصاویر FE-SEM مواد سنتز شده و پوشش

نانوکامپوزیتی با ۶ درصد وزنی از پرکننده‌ها، (الف و ب): نانوسیم‌های نیکل، (پ و ت): ساختار هسته-پوسته Fe_3O_4 -PANI، (ج و د): نانولوله‌های عامل‌دار شده، (ه و ی): نانومواد پخش شده در پوشش نانوکامپوزیتی با حضور ۶ درصد وزنی از

هر جزء



(ب)

(ف)

۲- بررسی اثر محافظت از امواج الکترومغناطیسی پوشش‌های نانوکامپوزیتی

به تنوع در شیمی فضایی نانولوله‌های کربنی در جداره‌های متفاوت آن‌ها نسبت داده می‌شود که در بسیاری از پژوهش‌ها به خصوصیات خازنی آن‌ها اشاره شده است [۳۴] و آن‌ها را نانوذرات کم‌ویش رسانا قلمداد کرده‌اند [۳۲]؛ ولی نانوکامپوزیت‌های حاوی این نانوذرات می‌توانند با معادل بی‌نهایت مقاومت و خازن از نظر الکتریکی مدل‌سازی شوند [۵]. این نمادهای الکتریکی سبب می‌شوند تا با برخورد موج الکترومغناطیس افت اهمی^۳ روی دهد. بنابراین حضور نانولوله‌های کربنی توانایی جذب بخش عمده‌ای از موج الکتریکی را فراهم می‌کند [۳۵]. همچنین به‌کارگیری پلیمرهای رسانایی همچون پلی‌آنیلین با دارا بودن خواصی مانند هدایت الکتریکی ذاتی کم و وزن سبک می‌توانند مانند نانولوله‌های کربنی به‌واسطه افت اهمی، موجب جذب امواج الکترومغناطیس شوند [۳۶]. افت دیگری که می‌تواند منجر به تضعیف و جذب موج الکترومغناطیسی برخوردی شود، قطبش‌پذیری^۴ است. قطبش-پذیری ناشی از چهار نوع قطبش الکترونیکی^۵، اتمی^۶، دی‌پل^۷ و باردار بودن دانه‌های کریستالی اجسام^۸ است [۳۷ و ۳۸]. در حوزه میکروموج (X-band) تنها احتمال پاسخ بسامدی دی‌پل‌ها مغناطیسی وجود دارد [۳۷ و ۳۸]. در سوی مقابل، نانوذرات Fe_3O_4 و نانوسیم‌های نیکل خاصیت مغناطیسی بسیار مطلوبی داشته و دی‌پل مغناطیسی محسوب می‌شوند [۳۹ و ۴۰] و می‌توانند در برخورد با موج الکترومغناطیس بخشی از انرژی آن را صرف قطبش‌پذیری خود نمایند و بدین طریق موجب جذب موج مغناطیسی برخوردی شوند. در جمع‌بندی این بحث می‌توان نتیجه گرفت که علت عملکرد بهتر نانوکامپوزیت سه‌جزیی می‌تواند به جذب موج الکتریکی توسط نانولوله‌های کربنی و پلی‌آنیلین و جذب موج مغناطیسی توسط ساختار هسته-پوسته Fe_3O_4 -PANI و نانوسیم‌های نیکل نسبت داده شود. در مورد افزایش میزان جذب با افزایش درصد‌های وزنی پرکننده‌های حاضر در نانوکامپوزیت، واضح است که یک شبکه رسانا در زمینه، با تراکم بیشتری شکل گرفته و با افزایش احتمال برهم-کنش موج با این شبکه، موجب بهبود تلفات جذب شده است [۴۱].

به‌طورکلی، با برخورد موج الکترومغناطیس به یک ماده، سه پدیده انعکاس، جذب و عبور رخ می‌دهد [۵]. جذب، از طریق تعامل با حامل‌های بار متحرک و دوقطبی‌های الکتریکی/مغناطیسی، موجب تضعیف امواج می‌شود [۳۱]. حفاظت کارآمد، به توانایی عایق‌سازی و تضعیف میدان‌های الکترومغناطیسی برای کنترل انرژی تابش آن‌ها اطلاق می‌شود [۳۰] که برابر مجموع مکانیزم‌های تضعیف امواج شامل: جذب^۱، بازتاب^۲ و بازتاب‌های چندگانه می‌باشد [۱۵].

در شکل ۲، مقایسه نتایج حاصل از اتلاف جذب امواج الکترومغناطیس در پوشش نانوکامپوزیتی تهیه‌شده از نانوپرکننده‌ها در ماتریس پلی‌آکرلیک، انجام شده است. با توجه به شکل (۲-الف)، از بین پرکننده‌های تک‌جزیی به‌کارگرفته‌شده، نانوکامپوزیت حاوی ۶ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی با بیشترین مقدار جذب یعنی ۱۰ دسیبل، بهترین عملکرد را دارد. در شکل (۲-ب) نیز نتایج میزان جذب امواج توسط پوشش نانوکامپوزیتی متشکل از دو نوع نانوذرات، آورده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، در بین نانوکامپوزیت‌های دو جزیی، ذرات ترکیبی CNT/ Fe_3O_4 -PANI با جذب ۱۱ دسیبل، بیشترین مقدار جذب امواج را به خود اختصاص داده‌اند. با اضافه شدن Fe_3O_4 -PANI به نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی، افزایش کم‌وبیش ۱۰ درصدی میزان جذب، حاصل شده است که مقدار قابل توجهی نیست. در شکل (۲-ج) نیز نتایج برای نانوکامپوزیت‌های سه‌جزیی گزارش شده است. مشاهده می‌شود که نانوکامپوزیت متشکل از سه پرکننده با ۶ درصد وزنی از هر کدام، با مقدار تلفات جذب ۱۲ دسیبل، بالاترین جذب را نسبت به سایر غلظت‌ها دارد. موج‌های الکترومغناطیس از دو بخش موج الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند [۵]. دو پدیده شناخته‌شده افت اهمی و قطبش‌پذیری، عهده‌دار جذب این امواج هستند [۵]. نانولوله‌های کربنی چنددیواره، رفتار الکتریکی نیمه‌رسانا را از خود نشان می‌دهند [۳۲ و ۳۳]. علت این پدیده

⁵ Electronic

⁶ Atomic

⁷ Dipolar

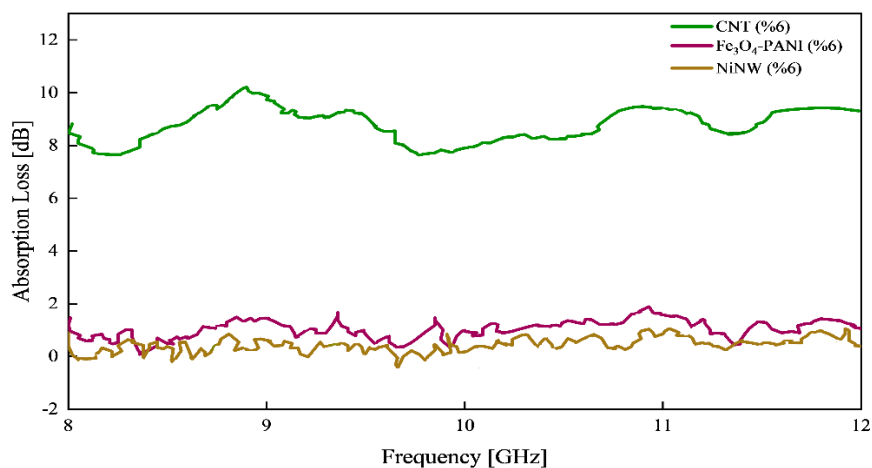
⁸ Interfacial

¹ Absorb

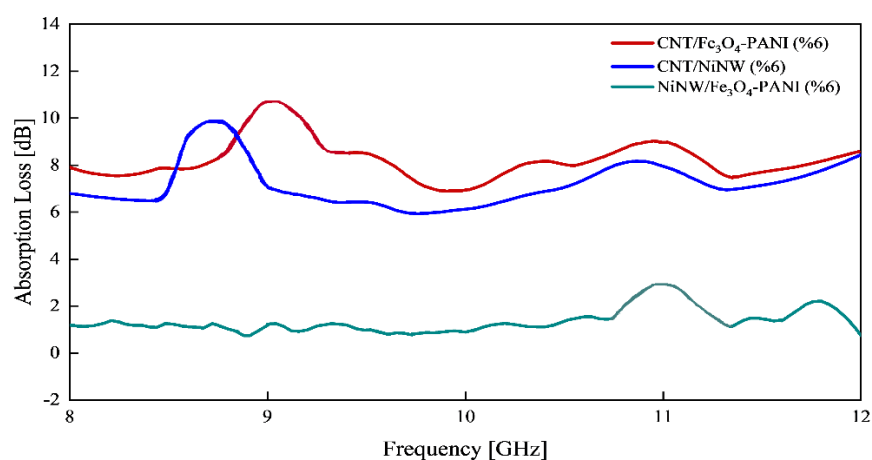
² Reflection

³ Ohmic Drop

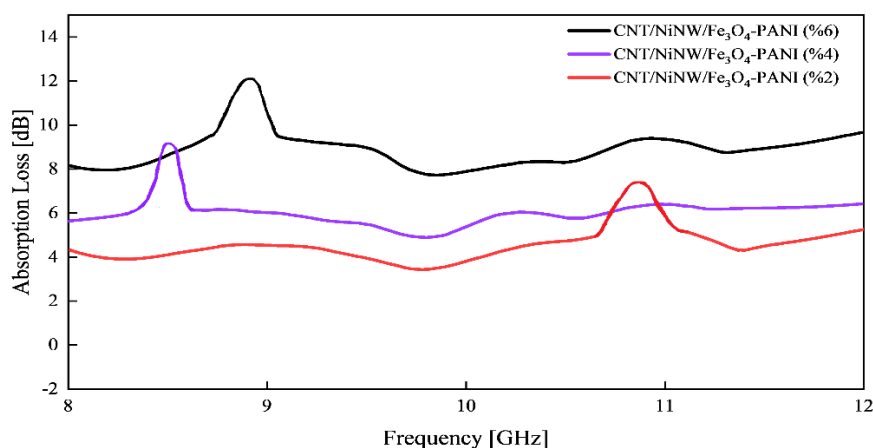
⁴ Polarizability



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. تلفات جذب پوشش‌های نانوکامپوزیتی مطالعه‌شده: نانوکامپوزیت‌های (الف) تک‌جزیی با غلظت ۶ درصد وزنی، (ب) دوجزییی با ۶ درصد وزنی از هر جزء و (ج) سه‌جزیی با غلظت‌های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی از هر جزء

اتلاف بازتاب؛ برابر با ۱۲ دسیبل؛ مربوط به نانوکامپوزیت حاوی ۶ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی است. نتایج، حاکی از آن است که نانوسیم‌های نیکل و نانوذرات اکسید آهن به‌تنهایی نقش

در شکل ۳، نتایج بررسی تلفات بازتاب در پوشش‌های نانوکامپوزیتی مطالعه‌شده، گزارش شده است. باتوجه‌به شکل (۳-الف)، از بین نانوکامپوزیت‌های تک‌جزیی، بیشترین میزان

از معادله (۱) بدست می‌آید [۵]:

$$SE_R = 168 - 10 \log \frac{\mu_r f}{\sigma_r} \quad (1)$$

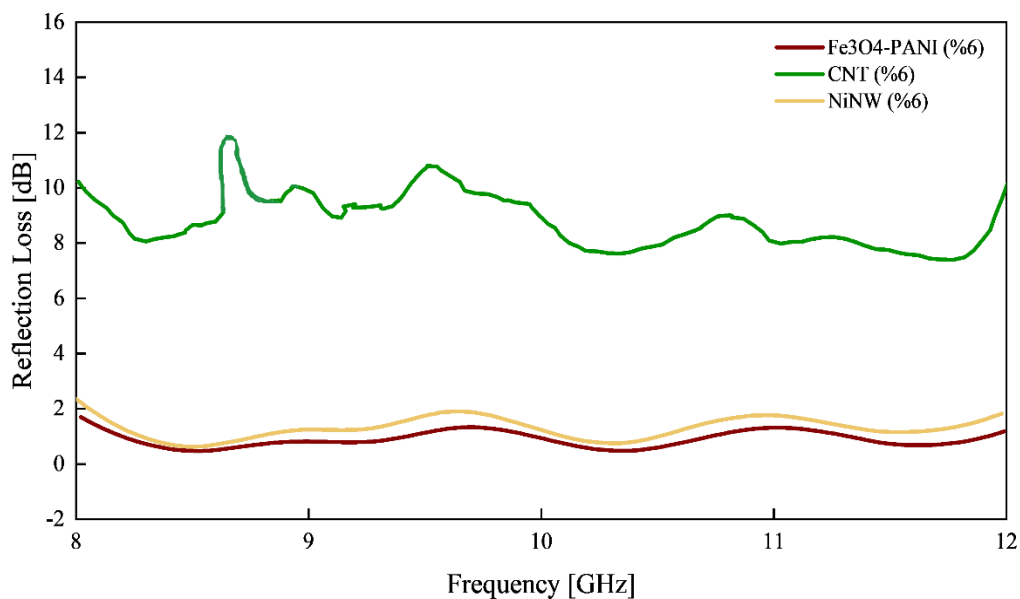
که در این رابطه f ، μ_r و σ_r به ترتیب بسامد امواج، نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریکی ماده است. مشهود است که برای محافظت با پدیده انعکاس لازم است نسبت μ_r/σ_r کوچک شود. به عبارتی انعکاس از نظر فیزیکی زمانی قابل ملاحظه خواهد بود که هدایت الکتریکی ماده بسیار بزرگ‌تر از نفوذپذیری مغناطیسی آن باشد. در سوی مقابل، محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی ناشی از جذب^۱ (SE_A) از معادله (۲) قابل محاسبه است [۵]:

$$SE_A = 131 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (2)$$

که در این رابطه t ضخامت نمونه است. واضح است که هر افزایش در μ_r و یا σ_r منجر به افزایش جذب خواهد شد؛ در صورتی که بازتاب وابسته به نسبت μ_r/σ_r است. بنابراین به نظر می‌رسد که تشکیل شبکه متراکم رسانا، نتوانسته است اثر قابل توجهی در کاهش این نسبت و به دنبال آن بر تلفات ناشی از بازتاب بگذارد.

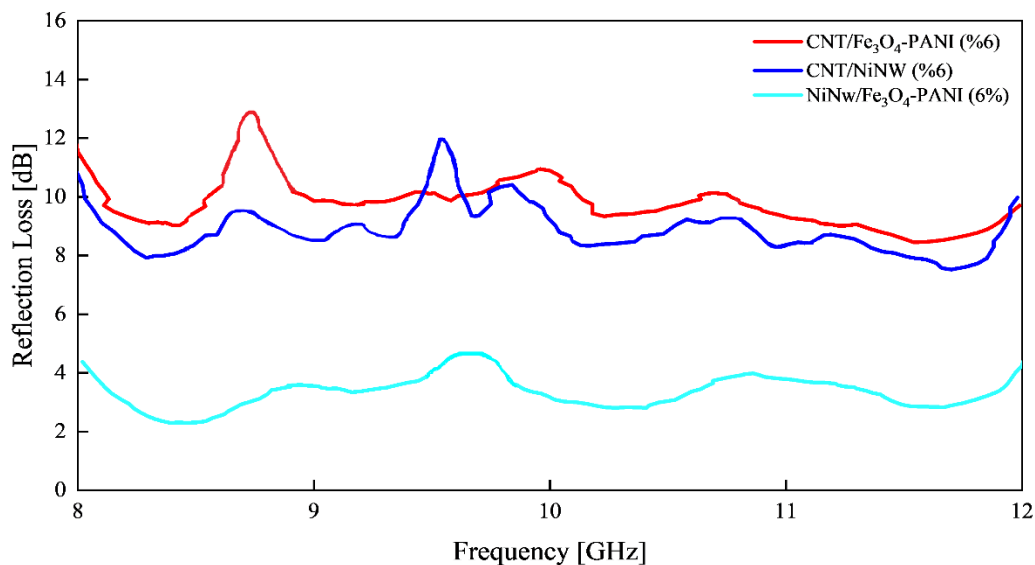
چندانی در بهبود اتلاف بازتاب و اثربخشی حفاظتی ندارند. در شکل (۳-ب)، بیشترین میزان اتلاف بازتاب از بین نانوکامپوزیت‌های دوجزئی تهیه‌شده نیز، در نمونه نانوکامپوزیتی ۶ درصد وزنی از ذرات ترکیبی CNT/Fe₃O₄-PANI با مقدار ۱۳ دسیبل رخ داده است. مشاهده می‌شود که با افزوده شدن Fe₃O₄-PANI به نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی، میزان بازتاب حدود ۱۰ درصد نسبت به حالت خالص افزایش می‌یابد. از آنجایی که مواد مغناطیسی می‌توانند موجب بروز پدیده اتلاف مغناطیسی شوند، از این رو، با تهیه پوشش نانوکامپوزیتی که متشکل از ترکیب مواد رسانا و مغناطیسی است، بهبود دو پدیده اتلاف دی‌الکتریک و مغناطیسی حاصل می‌شود [۴۲]. در شکل (۳-ج) نیز مشاهده می‌شود که نانوکامپوزیت متشکل از سه پرکننده با درصد وزنی ۶، با اتلاف بازتاب ۱۲ دسیبل نسبت به سایر غلظت‌ها، بالاترین میزان بازتاب را داشته است. دلیل این امر را می‌توان به بالا بودن ضریب هدایت الکتریکی و مغناطیسی پرکننده‌های موجود نسبت داد [۴۳].

نکته قابل ذکر در مورد یافته‌ها این است که اثرگذاری پرکننده‌ها بر تلفات جذب بسیار بیشتر از تلفات بازتاب است و تشکیل شبکه رسانا از پرکننده‌ها اثر قابل توجهی بر میزان اتلاف بازتابی موج الکترومغناطیسی نگذاشته است. مقدار محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی ناشی از انعکاس یا بازتاب (SE_R)

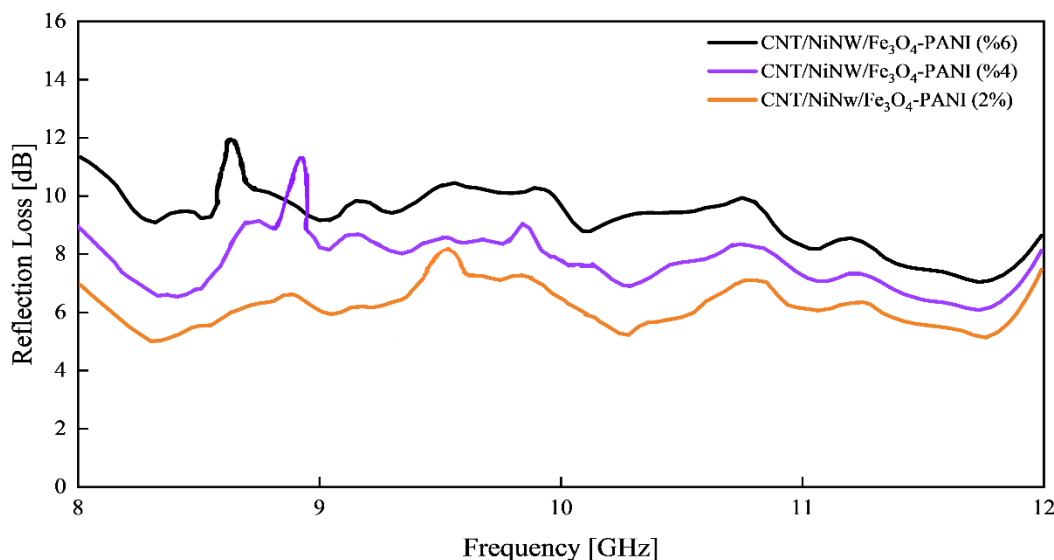


(الف)

¹ Effective Shielding Absorb



(ب)



(ج)

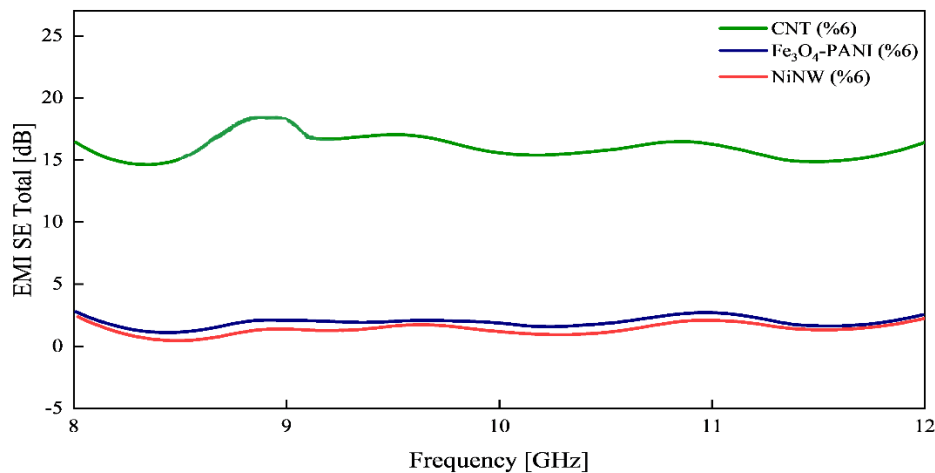
شکل ۳. تلفات بازتاب پوشش‌های نانوکامپوزیتی مطالعه‌شده: نانوکامپوزیت‌های (الف): تک‌جزیی با غلظت ۶ درصد وزنی (ب): دوجزیی با غلظت ۶ درصد وزنی از هر جزء و (ج): سه‌جزیی با غلظت‌های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی از هر جزء

بازتاب ۲۰ دسیبل بیشترین مقدار عایق‌سازی کارآمد کلی را داراست. مشاهده می‌شود که افزوده شدن ساختار هسته-پوسته پلی‌آنیلین-اکسید آهن به نانولوله‌های کربنی موجب بهبود اثربخشی محافظتی از ۱۸ به ۲۰ دسیبل می‌شود و در نهایت شکل (۳-ج)، بیانگر این نکته است که نانوکامپوزیت متشکل از سه پرکننده با درصد وزنی ۶، با بیشترین عایق‌سازی کارآمد کلی یعنی ۲۲ دسیبل، بهترین عملکرد را در بین سایر نمونه‌ها دارد. همان‌طوری‌که پیشتر بحث شد با افزایش درصد وزنی پرکننده‌ها،

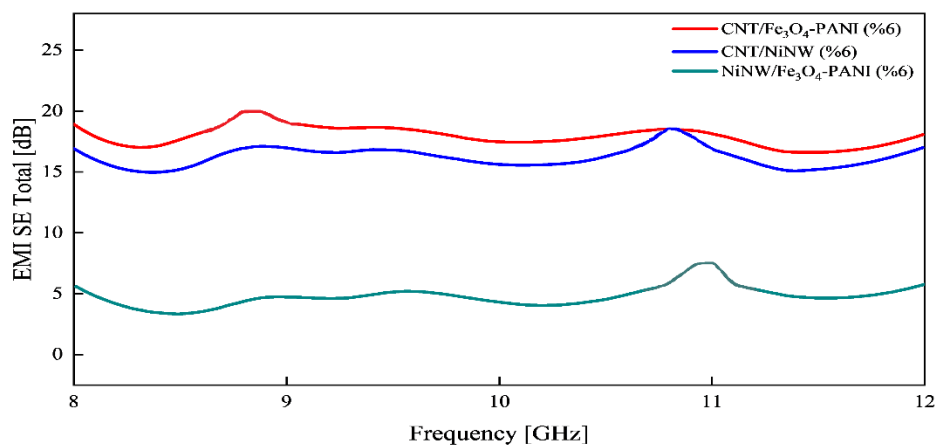
در شکل ۴، میزان عایق‌سازی کارآمد پوشش‌های نانوکامپوزیتی تهیه‌شده در برابر امواج الکترومغناطیس، مورد بررسی قرار گرفته است. این عامل، مجموع پدیده‌های بازتاب و جذب است. باتوجه به شکل (۴-الف)، از میان نانوکامپوزیت‌های تک‌جزئی، نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی، بالاترین میزان عایق‌سازی کارآمد کلی را با مقدار ۱۸ دسیبل از خود نشان داد. در شکل (۴-ب)، از بین نانوکامپوزیت‌های دوجزیی، نانوکامپوزیت متشکل از ذرات ترکیبی CNT/Fe₃O₄-PANI با

الکترومغناطیس می‌شود [۴۴]. همان‌طوری‌که بحث شد در پدیده جذب امواج الکترومغناطیس دو عامل افت اهمی و قطبش‌پذیری نقش اساسی را ایفاء می‌کنند [۵]. ذرات اکسید آهن چون دی‌پل‌های مغناطیسی محسوب می‌شوند [۳۹]، با برخورد امواج، بخشی از انرژی آن‌ها را جذب کرده و قطبیده می‌شوند و بدین ترتیب در پدیده جذب نقش مثبتی را ایفاء می‌کنند. از طرفی، افزودن نانولوله‌های کربنی به ساختار هسته-پوسته $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PANI}$ نیز، با بهبود هدایت الکتریکی پلیمر زمینه، بستر مناسبی را برای جذب امواج فراهم می‌کند [۴۵ و ۴۶]. نانوسیم‌های نیکل نیز، به دلیل دارا بودن خواص مغناطیسی برتر و نیز ساختار ناهمسانگرد^۱ خود، در یک ماتریس دی‌الکتریک موجب افزایش جریان‌های گردابی^۲ شده و نیز با قطبیده شدن همانند ذرات اکسید آهن، عملکرد مطلوب‌تری را در بهبود محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس از خود ایفاء می‌کنند [۳۶].

به دلیل افزایش احتمال برهم‌کنش بیشتر امواج الکترومغناطیس با مسیرهای رسانای موجود درون پوشش نانوکامپوزیتی، اثر عایق‌سازی بیشتر نمایان می‌شود [۳۱]. بدیهی است که کاهش درصد وزنی در نانوکامپوزیت حاوی ۲ و ۴ درصد وزنی از پرکننده‌ها، از میزان برهم‌کنش امواج الکترومغناطیس با مسیرهای رسانا کاسته شده و روند نزولی در میزان اثربخشی محافظت از امواج الکترومغناطیس مشاهده می‌شود. با توجه به ناپایداری محیطی نانوذرات مغناطیسی نظیر اکسید آهن و عدم قابلیت استفاده از آن‌ها در حالت خالص به‌عنوان مواد جاذب، استفاده از هسته-پوسته این مواد با پلیمر رسانای پلی‌انیلین شرایط بهتری را عرضه می‌کند. نتیجه این پایدارسازی و هسته-پوسته نمودن، افزایش رسانایی و بهبود خواص محافظت الکترومغناطیسی است [۳۲]. گزارش‌های معتبری از منابع در دسترس است که نشان می‌دهد، افزودن اکسید آهن موجب بهبود خصوصیات جذب امواج

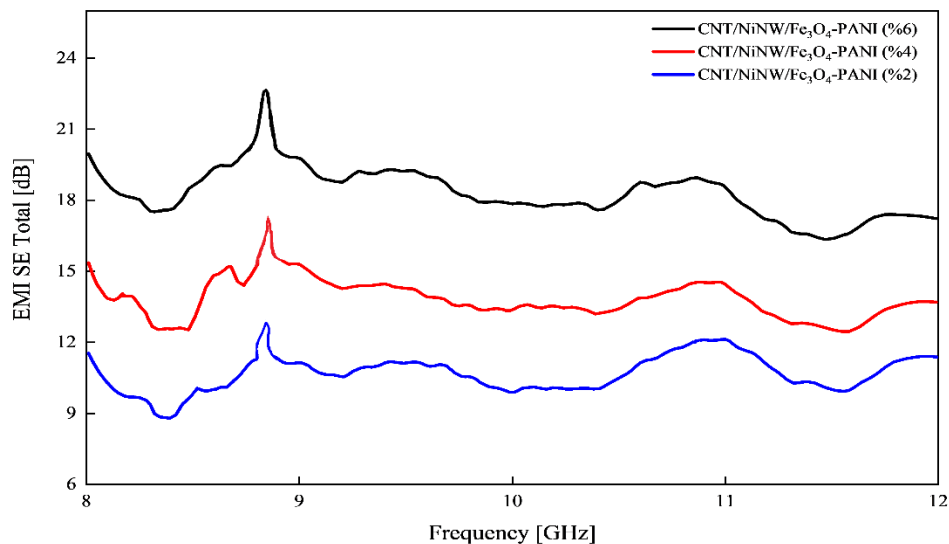


(الف)



(ب)

² Eddy Current¹ Anisotro

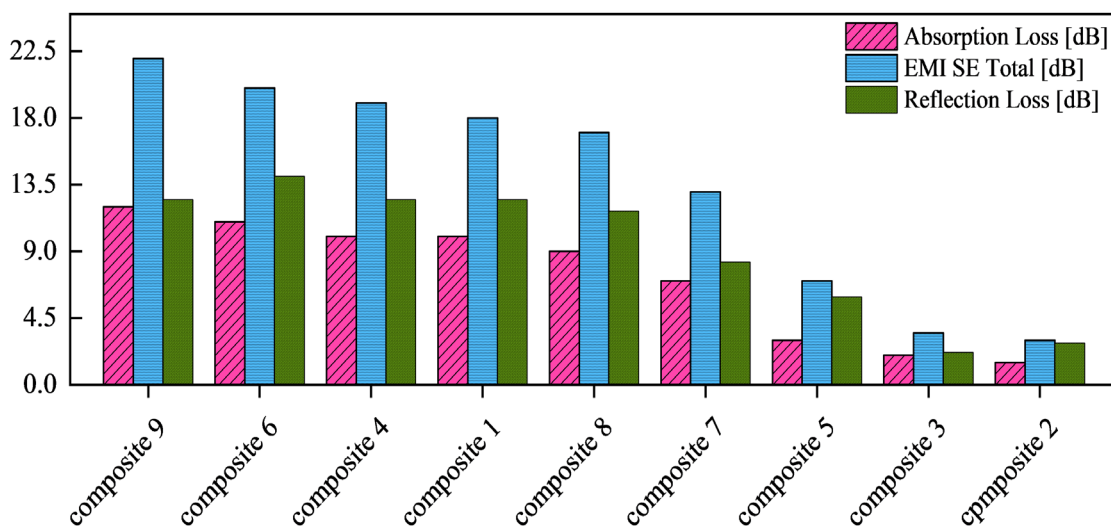


(ج)

شکل ۴. عایق‌سازی کارآمد کلی پوشش‌های نانوکامپوزیتی مطالعه‌شده: نانوکامپوزیت‌های (الف): تک‌جزیی با غلظت ۶ درصد وزنی (ب): دو-جزیی با غلظت هر جزء ۶ درصد وزنی و (ج): سه‌جزیی با غلظت‌های ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی از هر جزء

حاصل، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب پوشش نانوکامپوزیتی شماره (۹) با بیشترین مقدار عایق‌سازی کارآمد کلی برابر با ۲۲ دسیبل است.

به‌منظور مقایسه بهتر اثر محافظت از امواج الکترومغناطیس بر روی پوشش‌های نانوکامپوزیتی تهیه‌شده و بررسی پارامترهای مربوطه، نمودارهای جذب، بازتاب و عایق‌سازی کارآمد کلی در شکل ۵ قرار داده شده‌اند و مقایسه نتایج



شکل ۵. مقایسه اثر محافظت از امواج الکترومغناطیس بر روی پوشش‌های نانوکامپوزیتی تهیه‌شده

پایدارسازی آن‌ها با تشکیل ساختارهای هسته و پوسته به کمک پلیمرهای رسانا مانند پلی‌آنیلین، کارآمدی عایق‌سازی کارآمد کلی را در برابر امواج الکترومغناطیس ارتقاء می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در جمع‌بندی کلی از یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تنها به‌کارگیری مواد نانوذرات تک‌جزیی نظیر اکسید آهن و نانوسیم-های نیکل، نمی‌تواند محافظت چشمگیری در مقابل امواج الکترومغناطیس ایجاد کند [۴۷ و ۴۸]. در سوی مقابل، تولید نانوکامپوزیت‌های چندجزیی متشکل از تمامی نانوذرات و

اندازه‌گیری مشخصه‌های الکترومغناطیسی نمونه‌ها تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

- Xue, B., Li, Y., Cheng, Z., Yang, Sh., Xie, L., Qin, Sh., Zheng, Q., "Directional electromagnetic interference shielding based on step-wise asymmetric conductive networks", *Nano-Micro Letters*, Vol. 14, No. 1, (2022), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00743-y>
- Zhang, N., Wang, Z., Song, R., Wang, Q., Chen, H., Zhang, B., Lv, H., Wu, Z., He, D., "Flexible and transparent graphene/silver-nanowires composite film for high electromagnetic interference shielding effectiveness", *Science Bulletin*, Vol. 64, No. 8, (2019), 540-546. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.03.028>
- Gu, J., Hu, Sh., Ji, H., Feng, H., Zhao, W., Wei, J., Li, M., "Multi-layer silver nanowire/polyethylene terephthalate mesh structure for highly efficient transparent electromagnetic interference shielding", *Nanotechnology*, Vol. 31, No. 18, (2020), 185303. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab6d9d>
- Zhu, X., Xu, J., Qin, F., Yan, Z., Guo, A., Kan, C., "Highly efficient and stable transparent electromagnetic interference shielding films based on silver nanowires", *Nanoscale*, Vol. 12, No. 27, (2020), 14589-14597. <https://doi.org/10.1039/D0NR03790G>
- Arjmand, M., *Electromagnetic interference shielding and dielectric properties of multi-walled carbon nanotube/polymer composites*, Doctoral dissertation, Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, (2014). Available at: <http://hdl.handle.net/11023/1379>
- Palanisamy, S., Tunakova, V., Hu, Sh., Yang, T., Kremenakova, D., Venkataraman, M., Petru, M., Militky, J., "Electromagnetic interference shielding of metal coated ultrathin nonwoven fabrics and their factorial design", *Polymers*, Vol. 13, No. 4, (2021), 484. <https://doi.org/10.3390/polym13040484>
- Thomassin, J. M., Jerome, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen, I., Detrembleur, C., "Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials", *Materials Science and Engineering*, Vol. 74, No. 7, (2013), 211-232. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.06.001>
- Arjmand, M., Apperley, T., Okoniewski, M., Sundararaj U., "Comparative study of electromagnetic interference shielding properties of injection molded versus compression molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites", *Carbon*, Vol. 50, No. 14, (2012), 5126-5134. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.06.053>
- Al-Saleh, M. H., Gelves, G. A., Sundararaj, U., "Copper nanowire/polystyrene nanocomposites: Lower percolation threshold and higher EMI shielding", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 1, (2011), 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.10.003>
- Chen, Y., Zhang, H. B., Wang, M., Qian, X., Dasari, A., Yu, Z. Z., "Phenolic resin-enhanced three-dimensional graphene aerogels and their epoxy nanocomposites with high mechanical and electromagnetic interference shielding performances", *Composites Science and Technology*, Vol. 152, (2017), 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.09.022>
- Chung, D. D. L., Eddib, A. A., "Effect of fiber lay-up configuration on the electromagnetic interference shielding effectiveness of continuous carbon fiber polymer-matrix composite", *Carbon*, Vol. 141, (2019), 685-691. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.09.081>
- Mondal, S., Ravindren, R., Bhawal, P., Shin, B., Ganguly, S., Nah, C., Das, N., "Combination effect of carbon nanofiber and ketjen carbon black hybrid nanofillers on mechanical, electrical, and electromagnetic interference shielding properties of chlorinated polyethylene nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 197, (2020), 108071. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108071>
- Zhang, D. Q., Liu, T. T., Shu, J. C., Liang, S., Wang, X., Cheng, J., Wang, H., Cao, S. M., "Self-assembly construction of WS₂-rGO architecture with green EMI shielding", *ACS Applied Materials &*

هدف از این تحقیق، تهیه پوشش نانوکامپوزیتی محافظ در برابر امواج الکترومغناطیس با کارآمدی بالا و خصوصیات: انعطاف‌پذیری، ضخامت کم، دوستاندار محیط‌زیست با فرایند تولید آسان بود. کاربرد این پوشش‌ها، جذب امواج برای مقاصد رادارگریزی در صنایع نظامی و محافظت از دستگاه‌های الکترونیکی و مخابراتی در برابر امواج مزاحم است. برای این منظور تعداد ۹ نمونه نانوکامپوزیتی با افزودن یک، دو و سه جزیی از نانوذرات نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های نیکل و ساختار هسته-پوسته Fe₃O₄-PANI با درصدهای مختلف وزنی تهیه شد. می‌توان نتایج به‌دست‌آمده از میزان اثربخشی محافظتی این پوشش‌های منعطف نانوکامپوزیتی را به شرح زیر خلاصه کرد:

- نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات، میزان عایق‌سازی کارآمد را در برابر امواج الکترومغناطیس افزایش می‌دهد.
- از میان نانوکامپوزیت‌های تک‌جزیی، پوشش نانوکامپوزیتی حاوی ۶ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی در بستر پلی‌آکرلیک، بیشترین مقادیر اتلاف جذب و بازتاب و در نهایت محافظت کارآمد را در برابر امواج الکترومغناطیس به‌ترتیب برابر با ۱۰، ۱۲ و ۱۸ دسیبل از خود نشان داد.
- همچنین یافته‌ها تصریح می‌کند که افزودن ۶ درصد وزنی از نانوسیم‌های مغناطیسی نیکل و یا Fe₃O₄-PANI در کنار نانولوله‌های کربنی و دوجزیی نمودن نانوکامپوزیت، با تشدید هم‌زمان پدیده‌های اتلاف دی-الکتریک و مغناطیسی، محافظت کارآمد را تا حدود ۲۰ دسیبل بالا می‌برد.
- افزودن هم‌زمان سه عامل پرکننده نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های نیکل و Fe₃O₄-PANI با ۶ درصد وزنی از هرکدام، و به‌عبارتی تولید نانوکامپوزیت سه‌جزیی، میزان محافظت کارآمد در برابر امواج را توانست تا مقدار قابل توجه ۲۲ دسیبل افزایش دهد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از زحمات و همکاری‌های آزمایشگاه آنتن دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی به‌دلیل همکاری در

- Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 7, No. 4, (2019), 93-100. <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.84403>
29. Blacksmith, P., Hiatt, R., Mack, R., "Introduction to radar cross-section measurements", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 53, No. 8, (1965), 901-920. <https://doi.org/10.1109/PROC.1965.4069>
 30. Al-Saleh, M. H., "Influence of conductive network structure on the EMI shielding and electrical percolation of carbon nanotube/polymer nanocomposites", *Synthetic Metals*, Vol. 205, (2015), 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.03.032>
 31. Al-Saleh, M. H., Sundararaj, U., "Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites", *Carbon*, Vol. 47, No. 7, (2009), 1738-1746. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.02.030>
 32. Ghorbani, M., Fazli, S., Soleimani Lashkenari, M., "Fabrication of PMMA/PANI/Fe₃O₄ as a novel conducting hybrid coating", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 57, No. 6, (2018), 591-599. <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1332205>
 33. Fathinejad, J. H., Javidfar, M. R., "Study on effect of aluminium nitrate on conductivity properties of hydrogel nanocomposite based on acrylic acid/CNTs", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 7, No. 2, (2018), 57-61. <https://doi.org/10.30501/jamt.2018.91467>
 34. Nguyen, K., Hoa, N. D., Hung, C. M., Le, D. T. T., Duy, N. V., Van Hieu, N., "A comparative study on the electrochemical properties of nanoporous nickel oxide nanowires and nanosheets prepared by a hydrothermal method", *RSC Advances*, Vol. 8, No. 35, (2018), 19449-19455. <https://doi.org/10.1039/C8RA02862A>
 35. Jang, M. G., Ryu, S. C., Juhn, K. J., Kim, S. K., Kim, W. N., "Effects of carbon fiber modification with multiwall CNT on the electrical conductivity and EMI shielding effectiveness of polycarbonate/carbon fiber/CNT composites", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, No. 14, (2019), 47302. <https://doi.org/10.1002/app.47302>
 36. Kim, Y. H., Park, S. J., "Roles of nanosized Fe₃O₄ on supercapacitive properties of carbon nanotubes", *Current Applied Physics*, Vol. 11, No. 3, (2011), 462-466. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.08.018>
 37. Dalton, C., *Rapid determination of parasite viability using AC electrokinetic techniques*, Doctoral dissertation, University of Wales, Bangor, (2002). Available at: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.396031>
 38. "Dielectric spectroscopy", Wikipedia, Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_spectroscopy
 39. Xing, Z. H., Wang, S. S., Xu, A. W., "Dipole-directed assembly of Fe₃O₄ nanoparticles into nanorings via oriented attachment", *CrystEngComm*, Vol. 16, No. 8, (2014), 1482-1487. <https://doi.org/10.1039/C3CE41690A>
 40. Wang, J., Zhang, L. Y., Liu, P., Lan, T. M., Zhang, J., Wei, L. M., Zhang, Y. F., "Preparation and growth mechanism of nickel nanowires under applied magnetic field", *Nano-Micro Letters*, Vol. 2, No. 2, (2010), 134-138. <https://doi.org/10.1007/BF03353631>
 41. Li, Y., Zhong, Y., Zhang, J., Xu, L., Wang, Q., Sun, H., Tong, H., Cheng, X., Miao, X., "Activity-dependent synaptic plasticity of a chalcogenide electronic synapse for neuromorphic systems", *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 1, (2014), 1-7. <https://doi.org/10.1038/srep04906>
 42. Talebi, H., Olad, A., Nosrati, R., "Fe₃O₄/PANI nanocomposite core-shell structure in epoxy resin matrix for the application as electromagnetic waves absorber", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 163, (2022), 106665. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106665>
 43. Ali, N. N., Atassi, Y., Salloum, A., Charba, A., Malki, A., Jafarian, M., "Comparative study of microwave absorption characteristics of (polyaniline/NiZn ferrite) nanocomposites with different ferrite percentages", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 211, No. 1, (2018), 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.02.017>
 44. Sushmita, K., Madras, G., Bose, S., "Polymer nanocomposites containing semiconductors as advanced materials for EMI shielding", *ACS Omega*, Vol. 5, No. 10, (2020), 4705-4718. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03641>
 45. Ahmad, H. S., Hussain, T., Nawab, Y., Salamat, S., "Effect of dielectric and magnetic nanofillers on electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon/epoxy composites", *Journal of Interfaces*, Vol. 11, No. 30, (2019), 26807-26816. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06509>
 14. Choi, H. Y., Lee, T. W., Lee, S. E., Lim, J. D., Jeong, Y. G., "Silver nanowire/carbon nanotube/cellulose hybrid papers for electrically conductive and electromagnetic interference shielding elements", *Composites Science and Technology*, Vol. 150, No. 1, (2017), 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.008>
 15. Shayesteh Zeraati, A., Mende Anjaneyalu, A., Pawar, S. P., Abouelmagd, A., Sundararaj, U., "Effect of secondary filler properties and geometry on the electrical, dielectric, and electromagnetic interference shielding properties of carbon nanotubes/polyvinylidene fluoride nanocomposites", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 61, No. 4, (2021), 959-970. <https://doi.org/10.1002/pen.25591>
 16. Liu, Y., Song, D., Wu, C., Leng, J., "EMI shielding performance of nanocomposites with MWCNTs, nanosized Fe₃O₄ and Fe", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 63, (2014), 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.014>
 17. Duan, H., Xu, Y., Yan, D. X., Yang, Y., Zhao, G., Liu, Y., "Ultrahigh molecular weight polyethylene composites with segregated nickel conductive network for highly efficient electromagnetic interference shielding", *Materials Letters*, Vol. 209, (2017), 353-356. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.053>
 18. Al-Saleh, M. H., Saadeh, W. H., Sundararaj, U., "EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric", *Carbon*, Vol. 60, (2013), 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.008>
 19. Li, Y., Chen, C., Zhang, S., Ni, Y., Huang, J., "Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding characteristics of multiwalled carbon nanotube filled polyacrylate composite films", *Applied Surface Science*, Vol. 254, No. 18, (2008), 5766-5771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.03.077>
 20. Fang F., Li, Y. Q., Xiao, H. M., Hu, N., Fu, S. Y., "Layer-structured silver nanowire/polyaniline composite film as a high performance x-band EMI shielding material", *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4, No. 19, (2016), 4193-4203. <https://doi.org/10.1039/C5TC04060E>
 21. Movassagh-Alanagh, F., Bordbar-Khiabani, A., Ahangari-Asl, A., "Three-phase PANI@Nano-Fe₃O₄@CFs heterostructure: fabrication, characterization and investigation of microwave absorption and EMI shielding of PANI@Nano-Fe₃O₄@CFs/epoxy hybrid composite", *Composites Science and Technology*, Vol. 150, (2017), 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.010>
 22. Shahzad, F., Lee, S. H., Hong, S. M., Koo, C. M., "Segregated reduced graphene oxide polymer composite as a high performance electromagnetic interference shield", *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 44, No. 8, (2018), 4707-4719. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3274-7>
 23. Yu, W. C., Wang, T., Liu, Y. H., Wang, Z. G., Xu, L., Tang, H. J., Dai, K., Duan, H., "Superior and highly absorbed electromagnetic interference shielding performance achieved by designing the reflection-absorption-integrated shielding compartment with conductive wall and lossy core", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 393, (2020), 124644. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124644>
 24. Han, X., Gai, L., Jiang, H., Zhao, L., Liu, H., Zhang, W., "Core-shell structured Fe₃O₄/PANI microspheres and their Cr (VI) ion removal properties", *Synthetic Metals*, Vol. 171, (2013), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.02.025>
 25. Olad, A., Nosrati, R., "Preparation and corrosion resistance of nanostructured PVC/ZnO-polyaniline hybrid coating", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 76, No. 1, (2013), 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.08.017>
 26. Kong, Y. Y., Pang, S. C. Chin, S. F., "Facile synthesis of nickel nanowires with controllable morphology", *Materials Letters*, Vol. 142, (2015), 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.140>
 27. Nasiri, A., Shariaty-Niasar, M., Rashidi, A., Amrollahi, A., Khodafarin, R., "Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 4, (2011), 717-723. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.01.006>
 28. Zadehnajar, P., Karbasi, S., Akbari, B., Mirmusavi, M. H., "Evaluation of physical and mechanical properties of electrospinning nanocomposite scaffolds poly ε-caprolactone-gelatin/multi walled carbon nanotube", *Journal of Advanced*

- interference shielding", *Nanomaterials*, Vol. 10, No. 3, (2020), 541. <https://doi.org/10.3390/nano10030541>
48. Zhang, F., Jia, Z., Wang, Z., Zhang, C., Wang, B., Xu, B., Liu, X., Wu, G., "Tailoring nanoparticles composites derived from metal-organic framework as electromagnetic wave absorber", *Materials Today Physics*, Vol. 20, (2021), 100475. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100475>
- Composite Materials*, Vol. 56, No. 1, (2022), 69-82. <https://doi.org/10.1177/00219983211052615>
46. Zhang, D., Yang, X., Cheng, J., Lu, M., Zhao, B., Cao, M., "Facile preparation, characterization, and highly effective microwave absorption performance of CNTs/Fe₃O₄/PANI nanocomposites", *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2013, No. 134, (2013), 1425. <https://doi.org/10.1155/2013/591893>
47. Wanasinghe, D., Aslani, F., Ma, G., Habibi, D., "Review of polymer composites with diverse nanofillers for electromagnetic