



# مشخصه‌سازی خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی کامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن

علیرضا نیک فرجام<sup>۱</sup>، رهام رفیعی<sup>۲\*</sup>، محمد حسین صبور<sup>۳</sup>، مصطفی طاهری<sup>۴</sup>

۱- استادیار گروه مکترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۴- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

\* تهران، کد پستی ۱۴۳۹۵۵۹۴۱ roham.rafiiee@ut.ac.ir

**چکیده-** استفاده از نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی در صنایع فضایی به علت خواص منحصر به فرد و چند منظوره آنها رونق خاصی یافته است. استخراج خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی مواد نانوکامپوزیتی در باند فرکانسی ۱۲/۴ تا ۱۸ گیگاهرتز مسأله مهمی برای توسعه این مواد بشمار می‌رود. در این مقاله بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی پلیمرهای تقویت شده با نانولوله‌های کربن صورت گرفته، خصوصیات از جمله رسانایی الکتریکی جریان مستقیم و جریان متناوب، گذردهی الکتریکی، ضرایب انتقال و انعکاس، تانژانت تلفات و عمق پوستی در باند فرکانسی  $Ku$  (۱۲/۴ تا ۱۸ گیگاهرتز) مشخصه‌سازی می‌شود. از روش پلیمریزاسیون درجا برای ساخت نانوکامپوزیت‌های متشکل از رزین وینیل‌استر و نانولوله‌های کربن چند جداره استفاده شده است. برای توزیع نانولوله‌های در بستر رزین از تجهیز التراسونیک استفاده شده است و برای اندازه‌گیری خواص الکتریکی نمونه‌ها از تحلیلگر بردار شبکه استفاده شده است. کسر وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره در حدود ۰/۱ تا ۳ درصد انتخاب شده است تا بتوان تأثیر میزان نانولوله بر روی خواص را ارزیابی کرد. در نهایت با استفاده از مدار معادل الکتریکی، رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس مطالعه نیمه‌تجربی توصیف می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** نانولوله کربن، نانوکامپوزیت، خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی، مطالعه آزمایشگاهی، مدار معادل.

## Characterization of the electrical and electromagnetic properties of CNT-based composites

A. Nikfarjam<sup>1</sup>, R. Rafiee<sup>2\*</sup>, M. H. Sabour<sup>3</sup>, M. Taheri<sup>4</sup>

1- Assist. Prof., Mechatronics Dept., Faculty of New Sciences & Tech., Tehran Univ., Tehran, Iran

2- Assist. Prof., Faculty of New Sciences & Tech., Tehran Univ., Tehran, Iran

3- Assist. Prof., Aerospace Dept., Faculty of New Sciences & Tech., Tehran Univ., Tehran, Iran

4- MSc, Aerospace Eng., Faculty of New Sciences & Technologies, Tehran Univ., Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439955941, Tehran, Iran. roham.rafiiee@ut.ac.ir

**Abstract-** Application of carbon nanotube reinforced polymers in space industry is widely dispread due to the unique and multi-purpose properties of them Therefore, extraction of electrical and electromagnetic properties of nanocomposite materials in the frequency band of 12.4 to 18 GHz is an important issue in their development procedure. In this paper, experimental investigations on electrical and electromagnetic properties of carbon nanotube reinforced polymers are performed. The investigated properties include AC and DC electrical conductivities, permittivity, transmission and reflection coefficients, loss tangent and skin depth in  $Ku$  frequency band (12.4-18 GHz). The in situ polymerization method is selected to fabricate multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/Vinylester nanocomposite. Ultrasonic device is used for dispersion of CNTs in resin and then Vector Network Analyzer (VNA) is employed for measurement of electrical properties of specimens. Weight fraction of MWCNT is chosen between 0.1 to 3 % in order to evaluate the influence of CNT content on investigated properties. Finally, equivalent circuit model is used to describe the observed behavior on the basis of semi-empirical study.

**Keywords:** Carbon Nanotubes, Nanocomposites, Electrical And Electromagnetic Properties, Experimental Study, Equivalent Circuit.

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از مواد پیشرفته به دلیل ویژگی‌های منحصر بفرد آنها یکی از ضرورت‌های صنعت به شمار می‌آید. استفاده از کامپوزیت‌ها در سازه‌های مورد استفاده در فضا به علت مزایای کاهش وزن، افزایش استحکام و عمر خستگی در حال توسعه می‌باشد. کاهش وزن به همراه افزایش استحکام در سازه‌های مورد استفاده در ماهواره‌ها و یا سفینه‌های فضایی منجر به افزایش قابلیت حمل محموله می‌شود. لذا روش‌های مختلف کاهش وزن در این سازه‌ها مورد نظر طراحان این حوزه قرار گرفته است. امروزه استفاده از نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی به علت خواص منحصر به فرد آنها از دیدگاه کاهش وزن و افزایش استحکام از یک طرف و همچنین خواص چند منظوره مقاومت حرارتی و هدایت الکتریکی مناسب در افق دید صنایع فضایی قرار گرفته است. اگرچه رزین به عنوان ماده زمینه نانوکامپوزیت‌ها عایق جریان الکتریکی می‌باشد و نمی‌تواند امواج الکترومغناطیسی را هدایت کند، ولی انتظار می‌رود که با افزودن نانولوله کربنی که رسانایی نوع چند جداره آن در حدود  $10^5$  تا  $10^7$  S/m گزارش شده است [۱]، به سطح مطلوبی از خواص الکتریکی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربن بر اساس کسر وزنی نانولوله کربنی مورد استفاده دست یافت. از همین حیث، بررسی خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربن مورد توجه محققین قرار گرفته است. فرکانس  $12/4$  تا  $18$  گیگاهرتز (باند فرکانسی  $Ku$ ) برای تبادل اطلاعات ماهواره‌های ارتفاع متوسط<sup>۱</sup> استفاده می‌شود و با توجه به کاربرد این مواد در سازه آنتن‌های سهموی ماهواره‌ها، از این باند فرکانسی در این مقاله استفاده شده است. تحقیقات بسیاری در زمینه استخراج خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربن به روش آزمایشگاهی انجام شده است که هر کدام از این تحقیقات در روش‌های استخراج پارامترها، نوع مواد (رزین و نانولوله‌های کربن) استفاده شده و باندهای فرکانسی و سایر مشخصات با یکدیگر متفاوت می‌باشند. در این میان چین و همکارانش [۲] به بررسی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی در محدوده فرکانسی  $0/75$  تا  $1/5$  گیگاهرتز پرداختند. چالا و

همکارانش [۳] به بررسی خواص الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی  $8$  تا  $10$  گیگاهرتز با استفاده از موج‌برهای مربعی پرداختند. ژائو و همکارانش [۴] و همچنین هوانگ و همکارانش [۵] به بررسی پارامترهای مذکور در باند فرکانسی  $x(8/2)$  تا  $12/4$  گیگاهرتز پرداختند. علاوه بر استفاده از موجبرها از دستگاه تحلیلگر بردار شبکه نیز برای استخراج پارامترهای پراکندگی (ضرایب انتقال و انعکاس) و در نهایت استخراج خواص الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی (در باندهای فرکانسی گیگاهرتز، معمولاً برای فرکانس‌های بالا) استفاده می‌شود. ساینی و همکارانش [۶]، پارامترهای مذکور را در باند فرکانسی  $Ku$  برای نانوکامپوزیت-های متشکل از رزین پلی‌آنیلین و ژین‌هوا<sup>۲</sup> و همکارانش [۷] برای نانولوله‌های کربنی تک‌جداره استخراج کردند.

ویژگی‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی نانولوله‌های کربن باعث شد تا بتوان از این مواد در زمینه‌های گسترده‌ای همچون صفحات نمایشگر [۸] و آنتن‌های فرستنده دوقطبی [۹] استفاده شود. همچنین در زمینه مدل‌سازی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی نیز تحقیقاتی بسیاری صورت گرفته است، در برخی از این پژوهش‌ها به ارائه مدار معادل الکتریکی از نانوکامپوزیت‌های متشکل از نانولوله‌های کربن و دی اکسید منگنز<sup>۳</sup> برای استفاده در باتری‌ها [۱۰]، در نانوکامپوزیت متشکل از نانولوله‌های کربن و پلی‌آنیلین<sup>۳</sup> برای استفاده در پیل‌های سوختی [۱۱]، در نانوکامپوزیت متشکل از نانولوله‌های کربن چند جداره و پلی‌آنیلین برای استفاده در ابرخازن‌ها [۱۲] و در نانوکامپوزیت متشکل از نانولوله‌های کربن چند جداره و دی اکسید تیتانیوم<sup>۴</sup> برای استفاده در پیل‌های خورشیدی [۱۳] انجام شده است.

در این مقاله به بررسی خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی بر اساس مشخصه‌سازی آزمایشگاهی پرداخته خواهد شد. خصوصیات از جمله رسانایی الکتریکی جریان مستقیم و جریان متناوب، گذردهی الکتریکی، ضرایب انتقال و انعکاس، تانژانت تلفات و عمق پوستی در باند فرکانسی  $Ku$  ( $12/4$  تا  $18$  گیگاهرتز) مورد بررسی واقع خواهد

2.  $MnO_2$   
3. PANI  
4.  $TiO_2$

1. MEO

شد و مدار الکتریکی معادل مبتنی بر یک روش نیمه‌تجربی<sup>۱</sup> استخراج خواهد شد.

## ۲- مطالعه آزمایشگاهی

### ۱-۲- مواد مورد استفاده و ساخت نمونه‌ها

رزین اپوکسی وینیل‌استر مورد استفاده در این تحقیق که با نام تجاری سووان-کور ۹۰۱ شناخته می‌شود، بر پایه اپوکسی بیسفنول تولید می‌شود و محصول شرکت سووان-کور تایوان است. این رزین دارای سفتی و مقاومت در برابر خستگی بسیار بالایی می‌باشد.

نانولوله‌های کربنی به کار رفته در این تحقیق از نوع چند جداره، محصول شرکت تحقیقات نانومواد تگزاس آمریکا می‌باشد که دارای قطر ۵ تا ۱۵ نانومتر، طول ۵۰ میکرومتر، خلوص بالای ۹۹٪ درصد و رسانایی الکتریکی بالای ۱۰۰ S/cm می‌باشند که به روش رسوب شیمیایی بخار<sup>۲</sup> تولید شده‌اند.

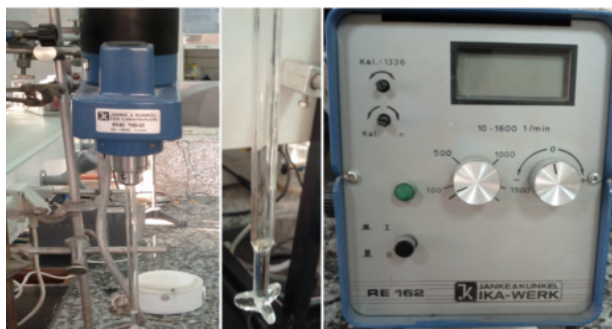
برای تکمیل فرایند پلیمریزاسیون و تبدیل نمونه‌های مایع به جامد در مدت ۱۰ تا ۲۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به منظور سخت شدن فوری نمونه‌ها و حفظ پراکندگی نانولوله‌های توزیع شده در رزین، از ۱/۵۰ درصد پراکسید، ۰/۳ درصد کبالت و ۰/۰۸ درصد دی‌متیل آنیلین استفاده شده است. سخت‌کننده‌های اشاره شده پس از ریختن محلول متشکل از رزین و نانولوله‌های کربن در قالب‌ها به محلول افزوده می‌شود و به واسطه اضافه کردن آنها، زنجیره‌های پلیمری تشکیل می‌شود.

در این پژوهش، از روش پلیمریزاسیون درجا<sup>۳</sup> برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. از این روش برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله کربن مبتنی بر رزین گرماسخت استفاده می‌شود. در حقیقت در این روش نانولوله با رزین مخلوط شده، با استفاده از امواج مافوق صوت به نحو مناسب در بستر رزین توزیع می‌گردد و در نهایت با فزودن مواد سخت کننده، فرایند تشکیل زنجیره‌های پلیمری و یا پلیمریزاسیون تحقق می‌یابد. در این تحقیق، چندین نمونه آزمایشگاهی که حاوی ۱/، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد

کسروزی نانولوله کربنی می‌باشند برای مطالعه آزمایشگاهی به روشی که متعاقباً تشریح خواهد گردید، ساخته شدند. برای پراکندگی (توزیع) نانولوله‌های کربن در پلیمر نیز از روش التراسونیک استفاده شده است.

ابتدا پلیمر و نانولوله کربن مورد نیاز به دقت با استفاده از ترازوی دیجیتال توزین می‌گردد. سپس از همزن مکانیکی دور بالا به مدت ۱۰ دقیقه با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای ترکیب اولیه محلول استفاده می‌شود که در شکل ۱ نمایش داده شده است. به منظور حذف حباب‌های ایجاد شده توسط همزن و همچنین توزیع مناسب‌تر نانولوله‌های کربن، به مدت ۳۰ دقیقه از حمام التراسونیک استفاده می‌شود. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است؛ از مخلوط آب و یخ در اطراف ظرف، برای کنترل دمای نمونه و جلوگیری از تبخیر استایرن استفاده می‌شود. سپس محلول به مدت ۵۰ دقیقه در معرض امواج مافوق صوت قرار می‌گیرد و در نهایت، سخت کننده سازگار با رزین در مدت زمان ۱۰ تا ۲۰ دقیقه به محلول اضافه می‌شود. استفاده از امواج التراسونیک در فاز مایع باعث ایجاد دو نوع مکانیزم جدا شدن نانولوله‌های منفرد از کلوخه و خرد شدن و شکستن کلوخه‌ها می‌شود.

همان طور که از شکل ۳ نمایان است، با افزایش زمان التراسونیک، رسانایی الکتریکی به نشانه بهبود توزیع نانولوله‌های کربن در رزین، بهبود نسبی پیدا کرده است. از آنجا که این بهبود در زمان ۵۰ دقیقه التراسونیک در اکثر درصد‌های کسروزی رخ داده است، لذا از زمان التراسونیک ۵۰ دقیقه برای فرایند ساخت نمونه‌ها در تمامی کسرهای وزنی مختلف استفاده شده است. شمای کلی فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱ همزن مکانیکی با سرعت ۱۰ تا ۱۶۰۰ دور بر دقیقه

1. Semi-Empirical
2. CVD
3. In-Situ Polymerization

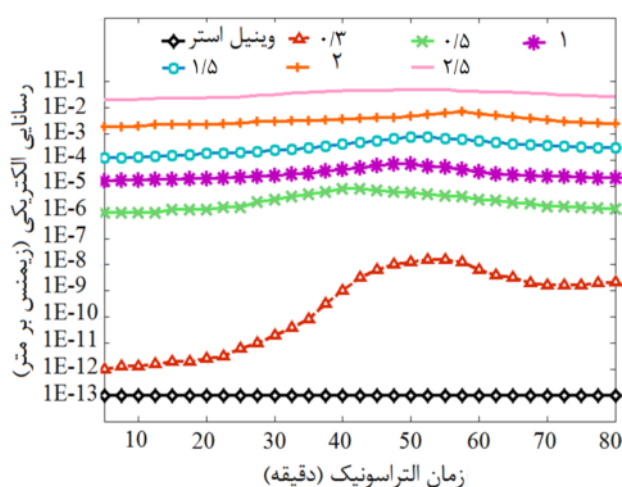
در نهایت رزین و نانولوله‌های کربن ترکیب شده در معرض امواج مافوق صوت (التراسونیک) قرار گرفته، پس از جدا شدن نانولوله‌های منفرد از کلوخه‌ها و خرد شدن کلوخه‌ها (توزیع مناسب نانولوله‌ها در محلول)، به منظور حفظ پراکندگی نانولوله‌ها و همچنین تکمیل فرایند پلیمریزاسیون از سخت کننده‌ها جهت سخت شدن فوری (۱۰ تا ۲۰ دقیقه‌ای) نمونه‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۲ استفاده از حمام التراسونیک بر روی محلول

## ۲-۲- تعیین هدایت الکتریکی جریان مستقیم

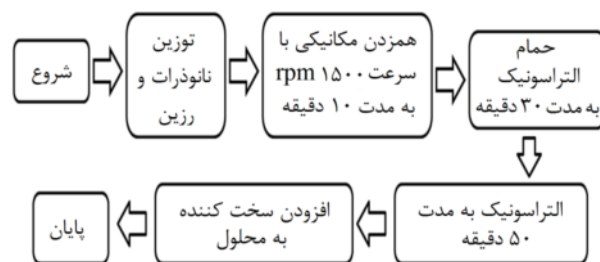
یکی از راه‌های متداول بررسی وضعیت توزیع نانولوله‌های کربن در رزین، استفاده از تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به عنوان یکی از راه‌های مستقیم بررسی نحوه انتشار نانولوله کربنی در ماده زمینه می‌باشد. با توجه به این امر که روش مذکور میزان انتشار را مورد ارزیابی قرار نمی‌دهد، در این پژوهش به عنوان یک روش جایگزین، از آزمون هدایت الکتریکی جریان مستقیم استفاده می‌شود. برای این منظور نمونه‌هایی با ابعاد  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  و کسر وزنی ۰/۳ تا ۳ درصد نانولوله کربنی ساخته شدند.



شکل ۳ اثر زمان التراسونیک بر هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت وینیل استر/ نانولوله کربن در درصد‌های مختلف وزنی نانولوله

## ۲-۳- استخراج هدایت الکتریکی جریان متناوب و خواص الکترومغناطیسی

برای استخراج گذردهی الکتریکی نانوکامپوزیت مورد مطالعه از نمونه‌هایی با ابعاد  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  و دستگاه تحلیلی بردار شبکه استفاده می‌شود و پارامترهای پراکندگی مشتمل بر ضرایب انتقال و انعکاس بدست می‌آید.



شکل ۴ فرایند ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربن برای بررسی خواص الکتریکی



شکل ۵ التراسونیک پروبی استفاده شده

در فرایند ساخت نمونه‌ها از حمام التراسونیک، برای پراکندگی مناسب نانولوله‌های کربنی در محلول و از التراسونیک پروبی، برای شکسته شدن کلوخه‌ها یا دسته نانولوله‌های کربنی استفاده شده است. در شکل ۵، استفاده از التراسونیک پروبی نمایش داده شده است.

پارامترهای استخراج شده از تست‌های الکتریکی (پارامترهای مستقیم) و پارامترهای محاسبه شده از نتایج آزمایشگاهی (پارامترهای غیر مستقیم) در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### ۳-۱- بررسی توزیع نانولوله کربن

در این تحقیق به منظور اطمینان از توزیع مناسب نانولوله کربنی در بستر رزین، از بررسی هدایت الکتریکی جریان مستقیم نمونه‌های استفاده می‌شود. در حقیقت هر چقدر توزیع نانولوله کربنی در بستر رزین مناسب‌تر باشد، منجر به دست یافتن به آستانه هدایت الکتریکی در کسر وزنی پایین‌تری از نانولوله کربنی خواهد شد.

برای بدست آوردن مقاومت الکتریکی حجمی ویژه نمونه‌ها و سپس هدایت الکتریکی آن‌ها به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود. همچنین از رابطه (۱) جهت حذف خطای ناشی از ابعاد نمونه‌ها استفاده شده است [۱۴]:

$$\rho_{(\Omega.cm)} = \frac{R(\Omega) \times A(cm)}{L(cm)} \quad (1)$$

$$\sigma_{\left(\frac{S}{cm}\right)} = \frac{1}{\rho_{(\Omega.cm)}} \quad (2)$$

در روابط فوق،  $R$ ،  $\rho$ ،  $\sigma$ ،  $A$  و  $L$  به ترتیب مقاومت الکتریکی، مقاومت ویژه حجمی، هدایت الکتریکی، مساحت و ضخامت نمونه می‌باشند. هدایت الکتریکی نمونه‌ها ۰/۳ تا ۳ درصد وزنی در شکل ۷ نمایش داده شده است. افزایش رسانایی الکتریکی با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربن، بیانگر توزیع مناسب نانولوله‌ها در رزین می‌باشد.

**جدول ۱** دسته‌بندی پارامترهای استخراج شده و محاسبه شده از

نتایج تست‌ها

پارامترهای استخراج شده از تست‌های آزمایشگاهی	پارامترهای محاسبه شده از نتایج آزمایشگاهی
تست مقاومت الکتریکی جریان مستقیم	رسانایی الکتریکی جریان مستقیم
تست گذردهی الکتریکی	رسانایی الکتریکی جریان متناوب
	عمق پوستی
	تانژانت تلفات
تست جهت استخراج نمودار امیدانسی	ارائه مدار معادل الکتریکی

با ترسیم رفتار هدایت الکتریکی بر حسب کسر حجمی نانولوله کربن و آستانه نفوذ به صورت لگاریتمی که در شکل ۷ ارائه شده است، رابطه (۳) بدست می‌آید [۵].

با توجه به روند ارائه شده در شکل ۶، پس از استخراج ضرایب انتقال و انعکاس نمونه‌ها و با در نظر گرفتن نفوذپذیری مغناطیسی برابر با یک (نمونه با خاصیت غیر مغناطیسی دارای نفوذپذیری در حدود ۱ می‌باشد، [۳،۴])، گذردهی الکتریکی محاسبه می‌شود. در نهایت با داشتن گذردهی الکتریکی، رسانایی الکتریکی جریان متناوب، عمق پوستی و تانژانت تلفات محاسبه می‌شوند.

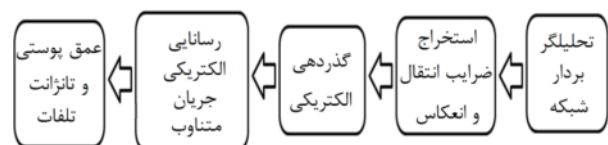
### ۲-۴- طیف‌سنجی امیدانسی الکتروشیمیایی

برای استخراج نمودار نایکوئیست امیدانسی از طیف‌سنج امیدانسی الکتروشیمیایی و نمونه‌های با ابعاد  $1 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$  استفاده می‌شود. از نتایج تست نمودار امیدانسی نیز بر اساس استفاده از مدل نیمه‌تجربی برای ارائه مدار معادل الکتریکی استفاده می‌شود.

### ۳- نتایج مطالعه آزمایشگاهی

از نتایج آزمون رسانایی الکتریکی مستقیم، برای بررسی توزیع نانولوله‌های کربنی در رزین و از رسانایی الکتریکی متناوب به منظور بررسی خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربن استفاده می‌شود. پارامترهای محاسبه شده از نتایج تست گذردهی الکتریکی نظیر عمق پوستی و تانژانت تلفات، به ترتیب برای بررسی ضخامت مؤثر نمونه‌های تحت امواج فرکانس بالا و بررسی خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده است.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شد، برخی از پارامترهای مورد مطالعه به صورت مستقیم از مطالعه آزمایشگاهی استخراج می‌شوند و برخی دیگر از پارامترها به صورت غیرمستقیم از نتایج مطالعه آزمایشگاهی محاسبه می‌شوند.



**شکل ۶** شمای کلی فرایند استخراج خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی

نانولوله‌ها در بستر رزین وابسته می‌باشد. توزیع مناسب نانولوله کربنی در بستر رزین و ممانعت از تجمع آنها به صورت موضعی و رخداد پدیده کلوخه شدن، منجر به تشکیل و تقویت شبکه هادی در نمونه‌ها می‌شود و این امر باعث بهبود هدایت الکتریکی می‌شود. عدم پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در رزین و تجمع آنها در نواحی مختلف به صورت موضعی، شبکه هادی را به شدت تضعیف کرده، افت نتایج را به دنبال دارد.

### ۳-۲- بررسی ضرایب انتقال/انعکاس و گذردهی الکتریکی

در روش انتقال/انعکاس، نمونه در موج‌بر قرار داده می‌شود و فاز و دامنه امواج منتقل و منعکس شده اندازه‌گیری می‌شوند. در نتیجه از تفاوت در امواج، اطلاعاتی در مورد خواص دی‌الکتریک مواد بدست می‌آید [۱۶]. پارامترهای پراکندگی، خروجی تحلیلگر بردار شبکه می‌باشند [۲]. نیکلسون و روس [۱۷] با استفاده از روابط (۴) و (۵) برای مواد الکتریکی با ضخامت کم، گذردهی الکتریکی مواد را با فرض نفوذپذیری مغناطیسی یک برای مواد غیرمغناطیسی محاسبه کردند:

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (4)$$

$$S_{12}(\omega) = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (5)$$

که در آن  $S_{11}$  سیگنال منعکس شده و  $S_{21}$  سیگنال منتقل شده می‌باشند. با داشتن ضریب انعکاس و با فرض نفوذپذیری مغناطیسی ۱، گذردهی الکتریکی توسط رابطه (۶) قابل محاسبه می‌باشد [۱۸]:

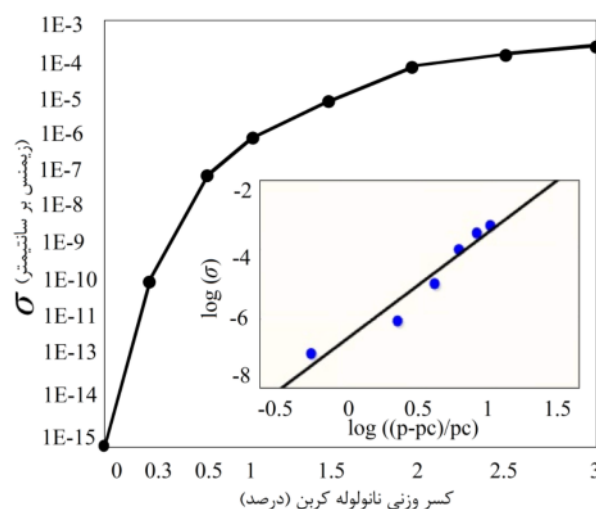
$$\Gamma = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} + 1} \quad (6)$$

در این رابطه  $\mu$  معرف نفوذپذیری مغناطیسی و  $\varepsilon$  گذردهی الکتریکی ماده می‌باشد.

گذردهی الکتریکی نسبی از یک بخش حقیقی گذردهی الکتریکی مختلط ( $\varepsilon'$ ) به نام ثابت دی‌الکتریک یا ذخیره کننده انرژی و یک بخش موهومی گذردهی الکتریکی مختلط ( $\varepsilon''$ ) یا تلفات دی‌الکتریک تشکیل می‌شود:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7)$$

بخش موهومی نشان دهنده توانایی مواد در جذب امواج رادیویی است. که در این رابطه، گذردهی الکتریکی خلاء برابر با

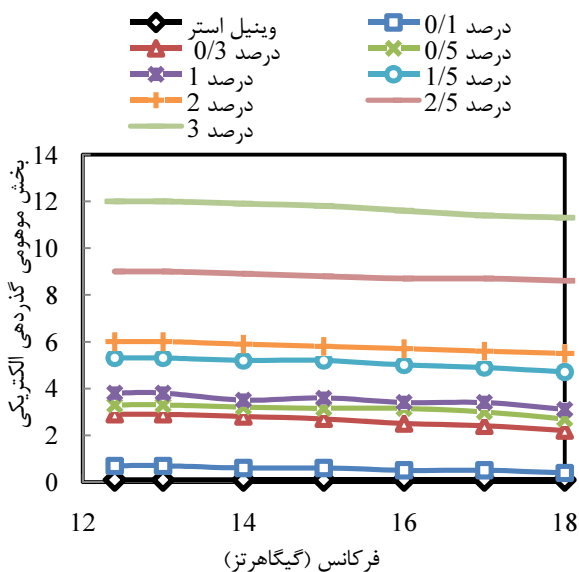


شکل ۷ میزان رسانایی الکتریکی جریان مستقیم نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/وینیل‌استر بر حسب کسر وزنی نانولوله کربنی

$$\sigma \propto (v - v_c)^\beta \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\sigma$  معرف رسانایی الکتریکی،  $v$  کسر حجمی نانولوله‌های کربن،  $v_c$  آستانه نفوذ و  $\beta$  نیز توان بحرانی می‌باشد. در نهایت  $\beta$  با توجه به نمودار لگاریتمی ترسیم شده در شکل ۷ برای نمونه با آستانه هدایت ۰/۳ با استفاده از روش حداقل مربعات برابر با ۲/۷ می‌باشد.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده شد بیشترین نرخ بهبود رسانایی الکتریکی در نمونه با ۰/۳ درصد وزنی رخ داده است. از نتایج مندرج در شکل ۷ معلوم است، میزان هدایت الکتریکی نمونه خالص رزین وینیل‌استر مورد استفاده معادل  $10^{-15}$  زیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد و با افزودن ۰/۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربنی، آستانه هدایت الکتریکی معادل  $10^{-10}$  زیمنس بر سانتی‌متر حاصل می‌شود. این در حالی است که گریشچوک و همکارانش [۱۵] با اضافه کردن ۰/۵ درصد کسر وزنی نانولوله کربنی به رزین وینیل‌استر به آستانه هدایت الکتریکی مذکور دست یافته‌اند. شاپان ذکر است که میزان هدایت الکتریکی رزین خالص مورد استفاده در تحقیق گریشچوک و همکارانش [۱۵] معادل  $10^{-12}$  زیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. دلیل این امر در توزیع مناسب‌تر نانولوله کربن در بستر رزین در تحقیق جاری در مقایسه با پژوهش گریشچوک و همکارانش می‌باشد. به عبارت دیگر، هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربن علاوه بر وابستگی به هدایت الکتریکی ماده زمینه و همچنین نانولوله‌های کربن، به صورت مشخص به نحوه توزیع



شکل ۹ بخش موهومی گذردهی الکتریکی نانوکامپوزیت در باند فرکانسی  $Ku$  برای ۵۰ دقیقه تراسونیک از ۰/۱ تا ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربن چنددیواره و رزین خالص

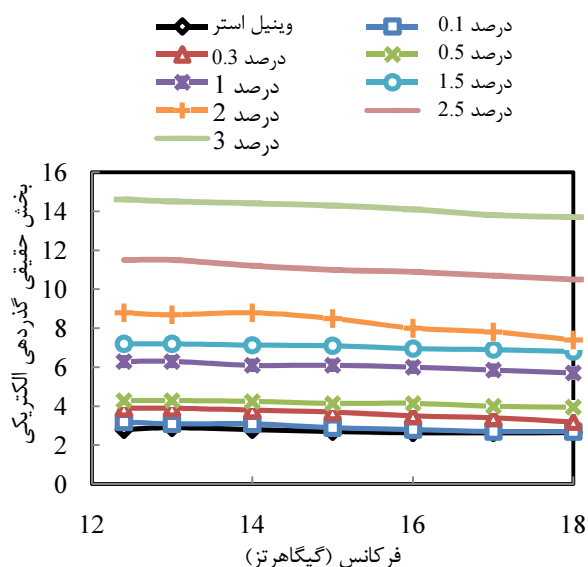
بخش موهومی گذردهی الکتریکی در نمونه‌های موجود در این مقاله به میزان نسبتاً مناسبی کاهش پیدا کرده است. علل اصلی این کاهش را می‌توان تشکیل نمونه‌هایی با توزیع مناسب نانولوله‌های کربن در رزین (که منجر به تشکیل شبکه هادی مناسب می‌شود)، افزایش خواص الکتریکی (به علت استفاده از کسر وزنی بهینه و توزیع مناسب آنها) و همچنین استفاده از فرکانس بالا اشاره کرد.

گذردهی الکتریکی نیز همچون هدایت الکتریکی به عنوان یکی از پارامترهای ذاتی مواد شناخته می‌شود و افزایش و کاهش آن به صورت غیرمستقیم، مؤثر بر خواص الکتریکی کلی ماده می‌باشد. بهبود هدایت الکتریکی نیز به عنوان پارامتری غیر مستقیم باعث بهبود خواص الکتریکی و در نتیجه کاهش جذب امواج الکترومغناطیسی می‌شود. مواد با خاصیت غیر-مغناطیسی یا خاصیت مغناطیسی پایین میزان جذب امواج الکترومغناطیسی بالایی داشته و برای استفاده در سازه‌های منعکس کننده مناسب نمی‌باشند. علت فیزیکی این پدیده را می‌توان چنین بیان کرد که در مواد با شبکه هادی ضعیف، امواج با عبور در کل ماده یا ضخامت بیشتری از ماده نارسانا، با سختی بیشتری عبور کرده و این عامل سبب افزایش دما (به علت عبور جریان‌های بالا) و در نتیجه تضعیف پارامتر فوق

$10^{-12} \times 8/85$  فاراد بر متر می‌باشد. هوانگ و همکارانش [۵] با افزودن ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی تک جداره به رزین اپوکسی، در فرکانس ۱۲/۴ گیگاهرتز، بخش حقیقی را ۷/۵ و بخش موهومی گذردهی الکتریکی را برابر با ۳ گزارش کرده‌اند. در حالی که در این پژوهش نانوکامپوزیت حاوی سه درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره و مبتنی بر رزین وینیل‌استر، در فرکانس ۱۲/۴ گیگاهرتز، معرف بخش حقیقی ۱۴/۶ و بخش موهومی ۱۲ می‌باشد.

بخش حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن چند جداره از ۰/۱ تا ۳ درصد وزنی در باند فرکانسی  $Ku$  برای ۵۰ دقیقه تراسونیک در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. گذردهی الکتریکی مختلط ( $\epsilon^*$ ) به طور غیر مستقیم با استفاده از پارامترهای پراکندگی با استفاده از دستگاه تحلیلگر بردار شبکه<sup>۱</sup> قابل محاسبه می‌باشد.

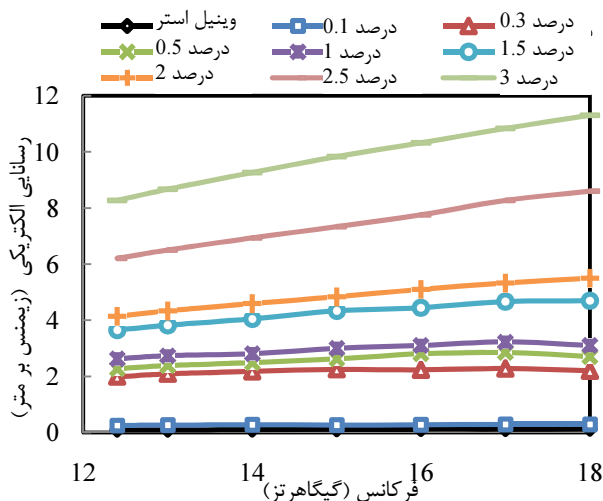
همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، نانوکامپوزیت‌ها با گذردهی موهومی بالا دارای خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی بالایی می‌باشند که این ویژگی برای استفاده در سازه‌های منعکس کننده‌ایی همچون آنتن‌های سهموی مناسب نمی‌باشد.



شکل ۸ بخش حقیقی گذردهی الکتریکی نانوکامپوزیت در باند فرکانسی  $Ku$  برای ۵۰ دقیقه تراسونیک از ۰/۱ تا ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربن چنددیواره و رزین خالص

1. Vector Network Analyzer (VNA)

می‌باشد و با توجه به تحلیل‌های فرکانس بالا که در این مقاله صورت گرفته است، می‌توان رسانایی الکتریکی جریان متناوب را به عنوان یکی از اثرگذارترین پارامترها دانست.



شکل ۱۰ رسانایی الکتریکی جریان متناوب نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن چند جداره در باند فرکانسی  $Ku$  از ۰/۱ تا ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربن چنددیواره و رزین خالص

با توجه به استخراج غیرمستقیم این پارامتر از گذردهی الکتریکی موهومی، در نهایت بالا بودن و مناسب بودن این پارامتر به علت مناسب بودن گذردهی الکتریکی می‌باشد که در بخش قبل به آن اشاره شد.

### ۳-۴- عمق پوستی

عمق پوستی فاصله‌ای است که توانایی میدان الکترومغناطیسی منتشر شده در یک ماده را مورد بررسی قرار می‌دهد. عمق پوستی بیانگر حداقل ضخامت مورد نیاز برای عبور جریان الکتریکی می‌باشد. کم شدن این ضخامت و جاری شدن جریان در لایه‌های بالایی نمونه‌ها سبب بهبود عملکرد و انعکاس مناسب نمونه‌ها می‌شود. عمق پوستی با استفاده از رابطه (۹) بیان می‌شود [۱۹]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (9)$$

که در آن  $\rho$  مقاوت ویژه بر حسب  $\Omega \cdot m$ ،  $f$  فرکانس بر حسب هرتز و  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی ( $4\pi \times 10^{-7}$ ) می‌باشد.

می‌شود. اما در صورتی که رسانایی ماده بالا باشد و از فرکانس بالا نیز استفاده شود، امواج الکترومغناطیسی از ضخامت محدودی از سطح عبور کرده و به علت رسانایی الکتریکی بالا، جریان عبوری به سادگی از نمونه‌ها عبور کرده، منجر به افزایش دما و یا تخریب نمونه‌ها نخواهد شد.

### ۳-۳- رسانایی الکتریکی جریان متناوب

رسانایی الکتریکی جریان متناوب نیز با استفاده از بخش موهومی گذردهی الکتریکی استخراج شده از تحلیلگر بردار شبکه طبق رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد [۱۹]:

$$\sigma_{mw} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (8)$$

که در آن،  $\sigma$  رسانایی الکتریکی (S/m)،  $f$  فرکانس بر حسب هرتز،  $\varepsilon_0$  گذردهی الکتریکی خلاء ( $10^{-12} \text{ F/m}$ ) و  $\varepsilon''$  بخش موهومی گذردهی الکتریکی می‌باشد.

اگرچه پایین بودن گذردهی الکتریکی سبب کاهش جذب یا افزایش انعکاس امواج مایکروویو در نمونه‌ها می‌شود که برای آنتن‌های سهموی مناسب می‌باشد ولی از طرفی این پایین بودن با توجه به رابطه مستقیم بخش موهومی با رسانایی الکتریکی جریان متناوب، باعث کاهش جزئی این پارامتر می‌شود (تأثیر گذردهی موهومی با توجه به مرتبه فرکانس  $10^9$ ) بسیار جزئی می‌باشد).

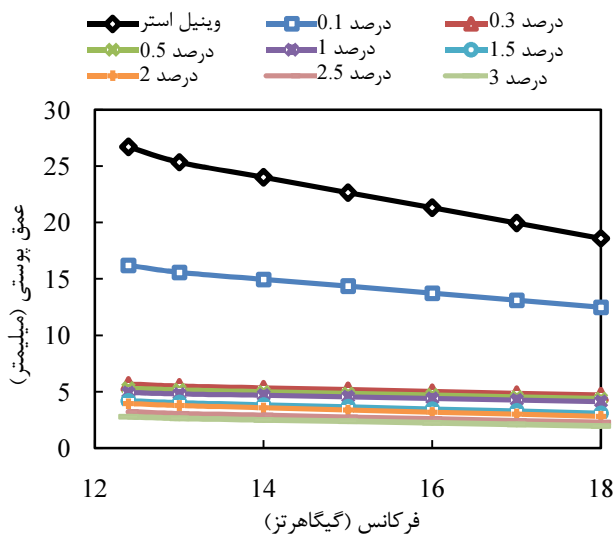
ژین‌هوا و همکارانش [۷] در نانوکامپوزیت متشکل از نانولوله‌های کربن تک جداره و پلی اتیل متاکریلات<sup>۱</sup> با ۴ درصد وزنی نانولوله کربنی، رسانایی الکتریکی ۴/۱۱ را در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز گزارش کردند در حالی که در این پژوهش با ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی در رزین وینیل‌استر در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز، رسانایی الکتریکی ۱۱/۳ استخراج شد که همچنان بهبود نتایج را می‌توان مشاهده کرد.

رسانایی الکتریکی جریان متناوب در نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن چند جداره بر حسب کسرهای وزنی مختلف نانولوله کربن، در باند فرکانسی  $Ku$  برای ۵۰ دقیقه تراسونیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

اصلی‌ترین پارامترها در بحث بررسی خواص الکتریکی مواد، رسانایی الکتریکی جریان مستقیم و جریان متناوب آنها

1. Poly Ethyl Methacrylate (PEMA)





شکل ۱۱ عمق پوستی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن چند-جداره در باند فرکانسی  $Ku$  از ۰/۱ تا ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربن چنددیواره و رزین خالص

این موضوع باعث کاهش فوق العاده هزینه‌های ساخت این نوع از نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. همواره می‌توان عمق پوستی را با افزایش میزان پرکننده‌ها (معمولاً کمتر از ۱۰ درصد وزنی)، استفاده از رزین با خاصیت رسانایی الکتریکی بالاتر، استفاده از نانولوله‌های کربنی با خواص الکتریکی بالاتر، استفاده از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره کاهش داد.

### ۳-۵- تانژانت تلفات

تانژانت تلفات بیانگر توانایی ماده در تبدیل انرژی ذخیره شده به گرما است. بالا بودن این پارامتر و همچنین ضریب اتلاف (بخش موهومی گذردهی الکتریکی) نشان دهنده ماده‌ایی با قدرت جذب امواج بالا است [۲۰-۲۲]. این کمیت توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۷]:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \sigma \epsilon_0 \epsilon_r \quad (10)$$

در این رابطه  $\epsilon''$  بخش موهومی گذردهی الکتریکی نسبی مختلط،  $\epsilon_0$  ثابت دی‌الکتریک در خلاء و  $\sigma$  نیز رسانایی الکتریکی می‌باشد. همچنین از رسانایی جریان متناوب  $\sigma_{ac}$  نیز برای بیان توانایی رسانایی امواج الکترومغناطیس متناوب در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [۲۳].

تانژانت تلفات در نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن چند جداره در باند فرکانسی  $Ku$  در شکل ۱۲ ارائه شده است.

این پدیده در مواد رسانای الکتریکی کامل در فرکانس‌های بالا (مایکروویو) مانع عبور جریان به عمق آنها شده و سبب می‌شود تا در منطقه بسیار محدودی از سطح عبور کند.

یک رسانای الکتریکی کامل<sup>۱</sup> دارای عمق پوستی صفر می‌باشد [۱۹]، این عمق برای یک رسانای خوب مثل آلومینیوم در باند فرکانسی  $Ku$  در محدوده (۱۲/۴ تا ۱۸ گیگاهرتز) با نفوذپذیری مغناطیسی نسبی یک و مقاومت ویژه ( $\Omega \cdot m$ )  $2/65 \times 10^{-8}$ ، در محدوده ۰/۷۳۶ تا ۰/۶۱۱ میکرومتر می‌باشد. عمق پوستی پارامتری است که با تغییر فرکانس امواج بکار رفته تغییر خواهد کرد. بر طبق نتایج ساینی و همکارانش [۶]، عمق پوستی با افزایش فرکانس و میزان پرکننده‌ها همواره در حال کاهش خواهد بود.

عمق پوستی در نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن چند جداره در باند فرکانسی  $Ku$  در شکل ۱۱ ارائه شده است. عمق پوستی از ۲۶/۷ میلی‌متر در نمونه با رزین خالص به ۱/۹۷ میلی‌متر در نمونه با ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربن، کاهش یافته است. با توجه به این موضوع که عمق پوستی نیز به صورت غیر مستقیم از گذردهی الکتریکی استخراج می‌شود (این موضوع در رابطه (۸) نیز نشان داده شده است) در نتیجه علت اصلی کاهش عمق پوستی با افزایش کسر وزنی نانولوله‌های کربن را می‌توان در مناسب بودن میزان گذردهی الکتریکی نمونه‌ها جستجو کرد.

اگرچه میزان ۱/۹۷ mm در نمونه ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی در مقایسه با عمق پوستی مواد رسانایی همچون آلومینیوم با عمق پوستی  $0/611 \mu m$  در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز، میزان نسبتاً بالایی محسوب می‌شود ولی با توجه به خصوصیات الکتریکی و الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های رسانا، مقادیر استخراج شده با ۳ درصد وزنی، مقادیر نسبتاً مناسبی می‌باشند. با توجه به این موضوع که نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربن استحکام مکانیکی بالایی دارند، این میزان سبب می‌شود تا بتوان به ساخت پوسته‌های ضخیم با درصد‌های کم پرکننده (برای بالا بردن خواص مکانیکی) پرداخت و فقط سطح رویی را با توجه به عمق پوستی استخراج شده در شکل ۱۱ با درصد‌های بالای پرکننده تولید کرد.

1. Perfect Electric Conductor (PEC)

الکترومغناطیسی می‌شود.

#### ۴- مدل‌سازی

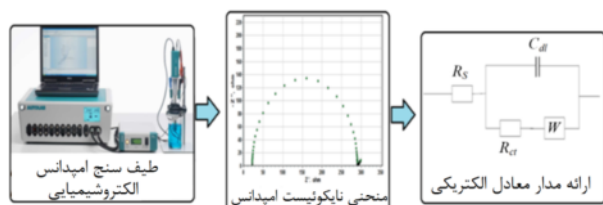
در شکل ۱۳ طرح‌واره استخراج مدار معادل الکتریکی از نتایج مطالعه آزمایشگاهی بر اساس یک روش نیمه-تجربی نشان داده شده است. که با استفاده از دستگاه طیف‌سنج امپدانس الکتروشیمیایی استخراج می‌شود. طیف‌سنج امپدانس، نمودار نانوکیویست امپدانس را بر حسب امپدانس حقیقی به امپدانس موهومی ارائه می‌کند و در نهایت از این نمودار جهت رسم مدار معادل الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها استفاده خواهیم کرد.

نمودارهای نانوکیویست امپدانس استخراج شده از طیف-سنج امپدانس الکتروشیمیایی، دارای یک بخش نیم‌دایره‌ای شکل و یک خط شیب‌دار می‌باشند، این نوع از نمودارها (نمودارهایی با یک ثابت زمانی)، توسط مدارات ساده الکتریکی مدلسازی می‌شوند.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودارهای نانوکیویست امپدانسی بترتیب برای نمونه‌های مبتنی بر ۰/۱ و ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره ارائه شده است.

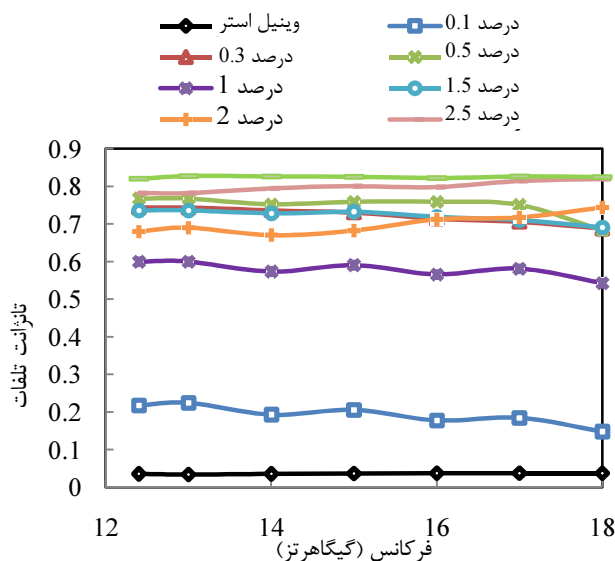
مدار معادل الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این مدار معادل از چهار المان الکتریکی مقاومت محلول<sup>۱</sup>، مقاومت انتقال بار<sup>۲</sup>، خازن دولایه<sup>۳</sup> و امپدانس واربرگ<sup>۴</sup> تشکیل شده است

مقادیر عددی المان‌های مدار معادل الکتریکی ارائه شده برای نانوکامپوزیت مورد مطالعه در کسرهای وزنی مختلف نانولوله کربن و در محدوده فرکانسی  $10^{-1}$  تا  $10^8$  در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱۳ شمای کلی از فرایند استخراج مدار معادل الکتریکی

1. Solution Resistance (RS)
2. Charge Transfer Resistance (Rct)
3. Double Layer Capacitance (Cdl)
4. Warburg Impedance



شکل ۱۲ تانژانت تلفات نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن از ۰/۱ تا ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربن چنددیواره و رزین خالص

مواد با  $\tan \delta \gg 1$  به عنوان رسانای مناسب و  $\tan \delta \ll 1$  به عنوان رسانای ضعیف جریان الکتریکی شناخته می‌شوند. در بسیاری از نمونه‌های کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربن  $\tan \delta \approx 1$  می‌باشد. بیشترین میزان تانژانت تلفات در نمونه حاوی ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربنی و معادل با ۰/۸۲۷ در این پژوهش بدست آمده است. در نهایت جذب امواج میکروویو و تبدیل این امواج به گرما، به گذردهی الکتریکی مختلط نسبی و تانژانت تلفات بستگی دارد [۲۴].

مقایسه مقادیر استخراج شده از نمودار تانژانت تلفات در نمونه با ۳ درصد کسر وزنی و نمونه با رزین خالص، بیانگر ماده‌ایی با قدرت جذب پایین‌تر می‌باشد. این پارامتر، رابطه معکوس با پارامتر عمق پوستی دارد، به صورتی که در نمونه با ۳ درصد کسر وزنی با ۱/۹۷ میلی‌متر عمق پوستی، تانژانت تلفاتی تقریباً برابر با یک را به نشانه کاهش قدرت جذب نمونه ارائه می‌دهد. در حالی که در نمونه با رزین خالص با عمق پوستی ۲۶/۷ میلی‌متر، تانژانت تلفات کمتر از ۰/۱ را به نشانه بالا بودن قدرت جذب امواج الکترومغناطیسی خواهیم داشت که این موضوع برای استفاده از این نوع نانوکامپوزیت‌ها در سازه آنتن‌های انعکاسی بسیار مناسب می‌باشد. در نهایت کاهش عمق پوستی باعث افزایش تانژانت تلفات و کاهش قدرت جذب امواج الکترومغناطیسی و افزایش انعکاس امواج

جدول ۲ مقادیر عددی المان‌های مدار معادل الکتریکی معادل

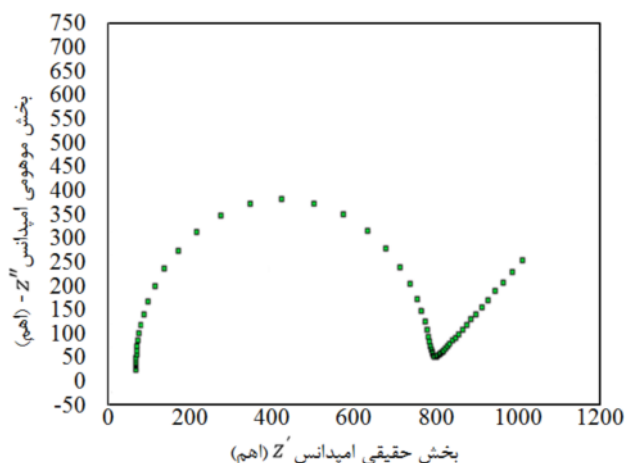
کسر وزنی نانولوله	مقاومت محللول	مقاومت انتقال بار	خازن دولایه	ضریب واربرگ
٪۰/۱	۶۷	۷۴۲	$1/5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-3}$
٪۰/۳	۴۸	۵۱۲	$3 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-2}$
٪۰/۵	۴۲	۴۳۸	$8 \times 10^{-7}$	$1/8 \times 10^{-2}$
٪۱	۳۶	۳۴۵	$3/4 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-2}$
٪۱/۵	۳۲	۳۲۷	$4/1 \times 10^{-8}$	$5/8 \times 10^{-2}$
٪۲	۲۷	۲۹۰	$6/3 \times 10^{-8}$	$7/4 \times 10^{-2}$
٪۲/۵	۲۵	۲۷۶	$7/1 \times 10^{-8}$	$8/1 \times 10^{-2}$
٪۳	۲۲	۲۶۸	$8/4 \times 10^{-8}$	$9/1 \times 10^{-2}$

با داشتن این نمودارها مدار معادل الکتریکی استخراج می‌شود و با توجه به مدار معادل و روابط فیزیکی مربوط به امپدانس (بخش حقیقی و موهومی امپدانس که دو پارامتر تشکیل دهنده نمودار نایکوئیست امپدانس می‌باشد)، داده‌های عددی جدول ۲ استخراج می‌شود.

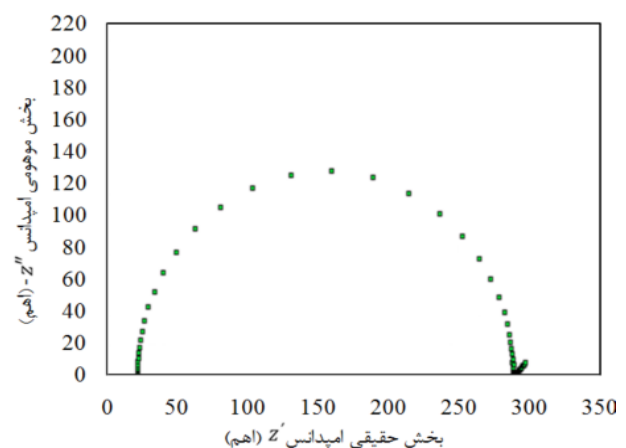
شی‌آو و همکارانش [۱۱] مقاومت انتقال بار را برای ۱ درصد وزنی از نانولوله‌های کربن چند جداره و پلی‌آنیلین، ۸۲۷ گزارش کردند در حالی که این پارامتر در ۱ درصد وزنی نانولوله کربن در این تحقیق ۳۴۵ می‌باشد. کاهش این پارامتر با افزایش درصد وزنی رابطه مستقیم دارد و نشان دهنده کاهش امپدانس مختلط می‌باشد.

### ۵- جمع‌بندی

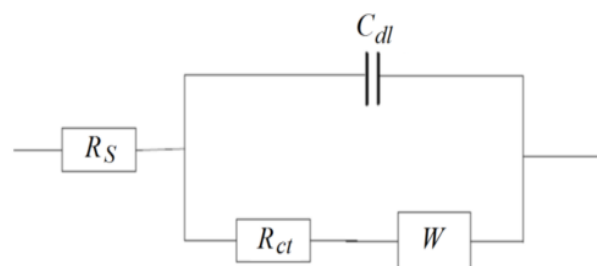
در این پژوهش به مشخصه‌سازی خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت نانولوله کربن/وینیل استر به روش آزمایشگاهی و سپس توسعه مدار معادل بر اساس رهیافت نیمه-تجربی پرداخته شده است. نتایج استخراج شده بیانگر رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربن در حدود  $10^{-4}$  S/cm برای ۳ درصد وزنی از نانولوله‌های کربن می‌باشد و این در حالی است که رسانایی الکتریکی رزین خالص  $10^{-15}$  S/cm می‌باشد. این میزان رسانایی الکتریکی در فرکانس باند  $Ku$ ، برای استفاده در آنتن‌های فضایی مقدار مناسبی بوده، سایر پارامترها همچون گذردهی الکتریکی، تانژانت تلفات نیز بیانگر این موضوع می‌باشند. بالا بودن مقادیر رسانایی الکتریکی جریان متناوب در مقایسه با رسانایی الکتریکی جریان مستقیم، به علت ظهور فرکانس در روابط و



شکل ۱۴ نمودار نایکوئیست امپدانس برای نمونه با ۰/۱ درصد نانولوله کربن در رزین وینیل استر



شکل ۱۵ نمودار نایکوئیست امپدانس برای نمونه با ۳ درصد کسروزی نانولوله کربن در رزین وینیل استر



شکل ۱۶ مدار معادل الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس نمودار نایکوئیست امپدانس شکل‌های ۱۴ و ۱۵ توسط دستگاه طیف‌سنج امپدانس الکتروشیمیایی استخراج می‌شود.

الکتریکی مختلط، عمق پوستی و تانژانت تلفات، می‌توان استفاده از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق را برای سازه‌های منعکس کننده امواج الکترومغناطیسی مانند آنتن‌های سهموی پیشنهاد کرد.

با توجه به این امر که پارامترهایی چون گذردهی الکتریکی، عمق پوستی و تانژانت تلفات به هدایت الکتریکی نمونه‌ها وابستگی دارد و در گروه پارامترهای ثانویه قرار می‌گیرند، هدایت الکتریکی به عنوان پارامتر اولیه مهم‌ترین شاخص عملکردی برای نانوکامپوزیت در سازه آنتن می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Ma P., Siddiquia N., Maromb. G., Kim. J., "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A Review", *Composites: Part A*, Vol. 41, No. 10, 2010, pp. 1345-1367.
- [2] Chin W., Lu C.L., Hsu W.K., "A radiofrequency induced intra-band transition in carbon Nanotubes", *Carbon*, Vol. 49, 2011, pp. 2648-2652.
- [3] Challa R.K., Kajfez D., Demir V., Gladden J.R., Elsherbini A., "Characterization of Multiwalled Carbon Nanotube (MWCNT) Composites in a Waveguide of Square Cross Section", *IEEE Microwave and wireless components letters*, Vol. 18, No. 3, 2008, pp. 161-163.
- [4] Zhao D.L., Li X., Shen Z.M., "Microwave absorbing property and complex permittivity and permeability of epoxy composites containing Ni-coated and Ag filled carbon nanotubes", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, 2008, pp. 2902-2908.
- [5] Huang Y., Li N., Ma Y., Du F., Li F., He X., Lin X., Gao H., Chen Y., "The influence of single-walled carbon nanotube structure on the electromagnetic interference shielding efficiency of its epoxy composites", *Carbon*, Vol. 45, No. 8, 2007, pp. 1614-1621.
- [6] Saini P., Choudhary V., Singh B.P., Mathur R.B., Dhawan S.K., "Enhanced microwave absorption behavior of polyaniline-CNT/polystyrene blend in 12.4-18.0 GHz range", *Synthetic Metals*, Vol. 161, No. 15-16, 2011, pp. 1522-1526.
- [7] ZhiHua P., Jing Cui P., Yan Feng P., Jie Yang W., "Complex conductivity and permittivity of single wall carbon nanotubes/polymer composite at microwave frequencies: A theoretical estimation", *Chinese Science Bulletin*, Vol. 53, No. 22, 2008, pp. 3497-3504.
- [8] Jun S.C., Choi J.H., Cha S.N., Baik C.W., Lee S.,

افزایش این پارامتر می‌باشد. این موضوع (بهبود نتایج الکتریکی و الکترومغناطیسی)، در فرکانس‌های بالا را می‌توان به وضوح در نتایج ارائه شده در این پژوهش مشاهده کرد.

با افزودن نانولوله‌های کربن به رزین وینیل‌استر می‌توان نانوکامپوزیت هادی جریان الکتریسیته تولید کرد. آستانه هدایت در ۰/۳ wt% بدست آمده است که نسبت به مقالات مشابه بهبود را نشان می‌دهد. استفاده از حمام التراسونیک (پیش از استفاده از التراسونیک پروبی) برای پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در محلول و حذف حباب‌های ایجاد شده توسط همزن مکانیکی، برای زمانی در حدود ۳۰ دقیقه، باعث بهبود نتایج می‌شود.

افزایش میزان نانولوله‌های کربن بر روی رسانایی الکتریکی جریان متناوب تا ۱۱/۳ S/m به نشانه بهبود رسانایی الکتریکی جریان متناوب و هدایت امواج میکروویو می‌باشد. همچنین افزایش میزان نانولوله‌های کربن بر روی عمق پوستی باعث کاهش عمق پوستی از ۲۶/۷ میلی‌متر به ۱/۹۷ میلی‌متر شده است که این کاهش باعث انعکاس مناسب‌تر امواج الکترومغناطیسی می‌شود. این پدیده در تانژانت تلفات نیز مشاهده شد، افزایش تانژانت تلفات نیز از ۰/۱ در رزین خالص تا ۰/۸۲۷ در نمونه با ۳ درصد کسر وزنی نانولوله کربنی باعث کاهش میزان جذب امواج الکترومغناطیسی شده است.

استفاده از نانولوله‌های کربن در رزین و افزایش آن تا ۳ درصد وزنی در نهایت منجر به تشکیل و تقویت شبکه هادی در نمونه‌ها می‌شود، این پدیده عامل اصلی بهبود نتایج استخراج شده می‌باشد. افزایش بیش از ۳ درصد وزنی منجر به تشکیل کلوخه‌هایی از نانولوله‌ها در محلول شده که این موضوع سبب عدم پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در رزین شده، در نهایت سبب تضعیف شبکه هادی و افت نتایج می‌شود. لذا علاوه بر کسر وزنی نانولوله کربنی به عنوان پارامتر تعیین کننده میزان هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت حاصل، چگونگی توزیع نانولوله کربن در بستر رزین و ممانعت از تجمع نانولوله به صورت خوشه‌های موضعی پارامتر بسیار مهم دیگری در میزان هدایت الکتریکی می‌باشد. در حقیقت توزیع مناسب نانولوله کربنی در محیط رزین به علت ایجاد شبکه هادی، نقش بسزایی در هدایت الکتریکی ایفا می‌نماید.

نتایج حاصل با توجه به نتایج استخراج شده از گذردهی

- [17] Nicolson A.M., Ross G.F., "Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques", *IEEE T. Instrum. Meas*, Vol. 19, 1970, pp. 377-382.
- [18] Håkansson E., Amiet A., Nahavandi S., Kaynak A., "Electromagnetic Interference Shielding and Radiation Absorption in Thin Polypyrrole Films", *European polymer journal*, Vol. 43, No. 1, 2007, pp. 205-213.
- [19] Micheli D., Apollo C., Pastore R., Marchetti M., "X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation", *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 2, 2010, pp. 400-409.
- [20] Joo J., Epstein A.J., "Electromagnetic radiation shielding by intrinsically conducting polymers", *Appl. Phys. Lett*, Vol. 65, No. 18, 1994, pp. 2278-2280.
- [21] Zhao D.L., Li X., Shen Z. M., "Microwave absorbing property and complex permittivity and permeability of epoxy composites containing Ni-coated and Ag filled carbon nanotubes", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, 2008, pp. 2902-2908.
- [22] Sharma B.K., Khare N., Sharma R., Dhawan S. K., Vankar V.D., Gupta H.C., "Dielectric behavior of polyaniline-CNTs composite in microwave region", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11-12, 2009, pp. 1932-1935.
- [23] Liu Z., Bai G., Huang Y., Ma Y., Du F., Li F., Guo T., Chen Y., "Reflection and absorption contributions to the electromagnetic interference shielding of single-walled carbon nanotube/polyurethane composites", *Carbon*, Vol. 45, No. 4, 2007, pp. 821-827.
- [24] Ku H., *Curing vinyl ester particle reinforced composites using microwaves*. Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, West Street, Toowoomba, 4350, Australia.
- Kim H.J., Hone J., Kim, J.M., "Radio-frequency transmission characteristics of a multi-walled carbon nanotube", *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 25, 2007, pp. 255701-255705.
- [9] Tans S.J., Verschueren R.M., Dekker C., "Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube", *Nature*, Vol. 393, 1998, pp. 49-52.
- [10] Chen Z., Yu A., Ahmed R., Wang H., Li H., Chen Z., "Manganese dioxide nanotube and nitrogen-doped carbon nanotube based composite bifunctional catalyst for rechargeable zinc-air battery", *Electrochimica Acta*, Vol. 69, 2012, pp. 295-300.
- [11] Qiao Y., Li C.M., Bao S.J., Bao Q.L., "Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 170, No. 1, 2007, pp. 79-84.
- [12] Zhang J., Kong L.B., Wang B., Luo Y.C., Kang L., "In-situ electrochemical polymerization of multi-walled carbon nanotube/polyaniline composite films for electrochemical supercapacitors", *Synthetic Metals*, Vol. 159, No. 3-4, 2009, pp. 260-266.
- [13] Sawatsuk T., Chindaduang A., Sae-kung. C., Pratontep S., Tumcharern G., "Dye-sensitized solar cells based on TiO<sub>2</sub>-MWCNTs composite electrodes: Performance improvement and their mechanisms", *Diamond & Related Materials*, Vol. 18, No. 2-3, 2009, pp. 524-527.
- [14] Glover J.D., Sarma M.S., Thomas J. Overbye, "Power System Analysis and design", 5th ed, Cengage Learning, Technology & Engineering - 174 p, 2008.
- [15] Gryshchuk O., Karger-Kocsis J., Thomann R., Konya Z., Kiricsi I., "Multiwall carbon nanotube modified vinyl ester and vinyl ester - based hybrid resins", *Manufacturing*, Vol. 37, No. 9, 2006, pp. 1252-1259.
- [16] Thostenson E.T., Chou T.W., "Microwave processing: fundamentals and applications", *Composites: Part A*, Vol. 30, No. 9, 1999, pp. 1055-1071.