



A Developed Model for Electrical Conductivity of Silicone Rubber-Carbon Nanotube (CNT) Nanocomposites Based on Power-Law Model

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohammadnabi S.¹
Rahmani Kh.^{1*}

How to cite this article

Mohammadnabi S, Rahmani Kh. A Developed Model for Electrical Conductivity of Silicone Rubber-Carbon Nanotube (CNT) Nanocomposites Based on Power-Law Model. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(04):253-263.

¹ Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

kh_rahmani@sbu.ac.ir

Article History

Received: August 03, 2021
Accepted: November 13, 2021
ePublished: February 22, 2022

ABSTRACT

In this paper, a new model has been proposed to estimate the electrical conductivity of polymer carbon nanotube (CNT) nanocomposites based on the conventional power-law model and Halpin-Tsai formulation. Halpin-Tsai model was originally presented to calculate the tensile modulus of composites, which can be modified for the estimation of the electrical conductivity by replacing the electrical parameters. The nature of the “b” exponent in the power-law model is defined according to CNT dimensions, CNT electrical conductivity, and the interphase thickness, and also the impacts of these parameters on the “b” and the electrical conductivity of nanocomposite are taken into consideration. The developed model interprets that the electrical conductivity of polymer-CNT nanocomposite increases as the concentration, length, and electrical conductivity of CNT and the interphase thickness increase. Furthermore, reduction in CNT diameter and waviness results in the growth of nanocomposite electrical conductivity. In order to validate the developed model, nanocomposite samples with different volume fractions were produced by the solid-state technique of the melt-blending method. The results of calculations and experimental procedures show good agreement.

Keywords Polymer nanocomposite, Carbon nanotube, Electrical conductivity, Melt-blending

CITATION LINKS

[1] Effects of thermal annealing ... [2] Electrocatalytic sensing of poly-nitroaromatic compounds ... [3] Phosphonium-based ionic liquid as dispersing agent ... [4] Development of an advanced Takayanagi equation ... [5] The mechanical behavior of CNT reinforced ... [6] Experimental determination of mechanical ... [7] Prediction of complex modulus in phase-separated poly (lactic acid) ... [8] Influence of oriented CNT forest on thermoelectric ... [9] Micromechanics Modeling of Electrical Conductivity ... [10] Electrical conductivity of interphase zone in polymer ... [11] Advancement of a model for electrical conductivity of polymer ... [12] A review of electrical conductivity models for conductive... [13] Analysis of DC electrical conductivity models of carbon ... [14] Electric conductivity in silicone-carbon ... [15] Silicone rubber composites reinforced by carbon nanofillers ... [16] An analytical model of effective electrical conductivity... [17] Modeling and characterization of the electrical conductivity... [18] Modeling and characterization of the electrical conductivity ... [19] A Percolation Model for Electrical Conduction in Wood ... [20] Simulation of percolation behavior of anisotropic ... [21] Stretchable conductor based on carbon nanotube/carbon ... [22] Strain-sensitive electrical conductivity of carbon ... [23] Preparation and Electrical Properties of Silicone ... [24] Thermoelectric properties of carbon nanotube/silicone rubber ... [25] Preparation of Bamboo-Like Carbon Nanotube Loaded Piezoresistive ... [26] Carbon nanotube-based elastomer composites—an approach ... [27] Design fuzzy system ... [28] Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites ... [29] Definition of “b” exponent and development of power-law model ... [30] A new analytical model for predicting the electrical ... [31] Electrical conductivity of chemically modified multiwalled carbon ... [32] <https://nanosadra.com/productsdatasheet.pdf> [33] Study of anti-icing performance of insulator strings ... [34] Reducing ice accumulation on insulators by applying semiconducting RTV ... [35] Strategies for palladium-catalyzed non-directed ... [36] <https://www.wacker.com/cms/en-us/siliconerubber.pdf> [37] Standard Test Method for Dielectric and Resistive Properties ... [38] Computing the Compressive Strength of Cement Composite ... [39] Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon ... [40] Investigation of microstructure and mechanical properties ... [41] The influence of carbon nanotube ...

مدل توسعه‌یافته برای هدایت الکتریکی کامپوزیت سیلیکون رابر- نانولوله کربنی بر اساس قانون توانی

سامان محمدنی

مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

خسرو رحمانی*

مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش، مدلی برای هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت سیلیکون رابر - نانولوله کربنی، بر اساس قانون توانی و رابطه هالپین-تسای، توسعه داده شده است. مدلی که عموماً در مقالات استخراج شده‌اند اثرات پارامترهای مختلف نانوذره و فاز میانی را در نظر نگرفته‌اند. مدل هالپین-تسای به منظور محاسبه مدول کششی کامپوزیت‌ها ارائه شده که با جای‌گذاری پارامترهای الکتریکی، می‌توان آن را با هدف تخمین هدایت الکتریکی، اصلاح کرد. در این مقاله ماهیت فیزیکی توان b در قانون توانی بر اساس پارامترهای مختلف نانوذرات و فاز میانی تعریف شده و تاثیر آنها بر b و هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مدل توسعه داده شده نشان می‌دهد هرچه غلظت، طول و هدایت الکتریکی نانولوله و ضخامت فاز میانی افزایش یابد، هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت نیز افزایش خواهد یافت. همچنین کاهش قطر و اعوجاج نانولوله نیز باعث افزایش هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری می‌شود. به منظور صحت‌سنجی رابطه توسعه‌یافته، نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصد‌های حجمی مختلف با روش اختلاط ذوبی حالت جامد ساخته شده و مورد آزمون هدایت الکتریکی قرار گرفته‌اند. نتایج محاسبات و آزمایش تجربی اختلاف شش درصدی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: نانوکامپوزیت پلیمری، نانولوله کربنی، هدایت الکتریکی، اختلاط ذوبی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

* نویسنده مسئول: kh_rahmani@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

خصوصیات فیزیکی منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی، به عنوان یک افزودنی در ماتریس‌های پلیمری به منظور تولید نانوکامپوزیت‌های با عملکرد بهتر، مورد توجه محققان در این حوزه قرار گرفته شده است [1-5]. هدایت حرارتی، الکتریکی، مقاومت مکانیکی و مدول الاستیک بالا، چگالی کم، و نسبت منظر (نسبت طول به قطر) بزرگ از جمله خصوصیات نانولوله کربنی به شمار می‌رود. در کامپوزیت‌های با ماتریس پلیمری و افزودنی نانولوله، شبکه‌های سه‌بعدی نانولوله بالاتر از کسر حجمی مشخص به نام آستانه نفوذ [6] ایجاد می‌شود. نانولوله‌های با نسبت منظر ۱۰۰۰-۵۰۰، شبکه‌ای مؤثر و با بازده بالا و آستانه نفوذ پایین را که باعث هدایت الکتریکی بالا می‌شود، تولید می‌کند [7]. نسبت منظر بالا به طور موثری آستانه نفوذ را کاهش داده و باعث افزایش هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت می‌شود [8]. آستانه نفوذ را می‌توان به صورت تجربی و با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت در

غلظت‌های مختلف نانولوله به دست آورد. آستانه نفوذ به نوع نانولوله، کیفیت توزیع در ماتریس و پارامترهای مختلف تولید و ساخت نانوکامپوزیت بستگی دارد. روش‌های مختلف و متعددی از جمله استفاده از التراسونیک، اختلاط برشی، استفاده از سورفکتانت و دیسپرسانت به منظور بهبود توزیع نانوذرات در ماتریس و کاهش آستانه نفوذ وجود دارد که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الکترون‌ها توانایی انتقال بین نانولوله‌های مجاور از طریق تونل را دارند؛ به همین دلیل، مکانیزم اصلی هدایت در نانوکامپوزیت‌های با ماتریس پلیمری و افزودنی نانولوله، تونل‌زنی الکترون است [9]. رسانایی الکتریکی از طریق این مکانیزم، به تماس فیزیکی نانولوله‌های مجاور نیاز نداشته و از طریق فواصل کوچک بین دو نانولوله برای انتقال الکترون استفاده می‌کند. به عبارت دیگر، نانولوله‌ها از نظر فیزیکی به هم متصل نبوده ولی رسانایی الکتریکی به وسیله فواصل مشخص تونل بین نانولوله‌های مجاور ایجاد می‌شود. نانوکامپوزیت‌هایی که دارای افزودنی با سطح ویژه بالا بوده و همچنین دارای اندرکنش بین سطحی بین نانولوله و ماتریس پلیمری هستند، فاز سومی به نام فاز میانی را تشکیل می‌دهند [10,11].

مدل‌های مرسوم متعددی به منظور تخمین هدایت الکتریکی وجود دارند [12]؛ اما این مدل‌ها عمدتاً اثرات فاز میانی، خواص مکانیزم تونل، پارامتر اعوجاج و نانولوله‌های دخیل در ایجاد شبکه را در نظر نمی‌گیرند. در مرجع [13] مدل‌های مرسوم از جمله مدل Mamunya و Sigmoidal function، Kirkpatrick، McLachlan بررسی و مقایسه شده و همچنین تاثیر پارامترهایی از قبیل آستانه نفوذ، کسر حجمی افزودنی و نسبت منظر افزودنی روی هدایت الکتریکی مطالعه شده است. مرجع [14] نیز پارامترهای اساسی شبکه همچون فاز میانی و فاکتورهای مربوط به نانولوله از جمله ابعاد آن را در نظر نگرفته است. در [15] که یک مقاله مروری است، به مراجعی پرداخته شده که هیچ‌کدام، پارامترهای شبکه و نانولوله را به طور کامل مطالعه نکرده‌اند؛ اثر ضخامت فاز میانی یکی از موارد بسیار مهم در نانوکامپوزیت‌ها است که در اکثر مراجع و مقالات به آن پرداخته نشده است. برخی محققان [16,17] مقالاتی با هدف پیش‌بینی هدایت الکتریکی مؤثر نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر اساس روش‌های میکرومکانیک با در نظر گرفتن اعوجاج نانولوله و خواص مکانیزم تونل، منتشر کرده‌اند اما خواص فاز میانی را بررسی نکرده‌اند. زارع، ری و پارک [18] رابطه‌ای برای تخمین هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت‌های با ماتریس پلیمری و افزودنی بر اساس مدل هالپین-تسای توسعه داده‌اند. از طرف دیگر، قانون توانی به عنوان رابطه‌ای متداول و مرسوم برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها برای درصد‌های نانولوله بالاتر از آستانه نفوذ به طور گسترده استفاده شده است [19-23]. در معادله قانون توانی (رابطه ۱)، هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت بر اساس هدایت

مطالعه شده است. به عبارت دیگر در این مقاله رابطه‌ای جدید و کاربردی با رویکرد شبکه هدایت و خواص نانولوله به دست آمده که می‌تواند در مطالعات آینده و به منظور بهینه‌سازی هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش مدل‌سازی

هدایت نانوکامپوزیت با ماتریس پلیمری و افزودنی نانولوله برای درصدهای بالاتر از آستانه نفوذ، با قانون توانی (رابطه ۱) مشخص می‌شود^[1].

$$\sigma = \sigma_f(\varphi_f - \varphi_p)^b \quad (1)$$

که در آن σ و σ_f به ترتیب هدایت الکتریکی کامپوزیت و نانولوله کربنی و φ_f و φ_p به ترتیب کسر حجمی نانولوله و آستانه نفوذ هستند و b یک توان است که پس از انجام تحلیل‌های تئوری و آزمون‌های تجربی اعداد $1/3$ تا $3/1$ برای آن ذکر شده است^[31]. می‌توان مقادیر b و φ_p را به صورت تجربی به دست آورد. با استفاده از رابطه‌ای که در مرجع^[18] برای هدایت الکتریکی کامپوزیت‌ها توسعه داده شده، می‌توان طبیعت و تعریف توان b را مشخص کرد. نویسندگان در مرجع^[18] تاثیرات ابعادی نانولوله، فاز میانی، قطر تونل، فاصله تونل بین دو نانولوله مجاور و اعوجاج نانولوله‌ها را بررسی کرده‌اند (رابطه ۲).

$$\sigma = \varphi_N \left(\frac{1 + 2\alpha\varphi_N}{1 - \varphi_N} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

که در آن φ_N کسر حجمی نانولوله‌های تشکیل دهنده پل هادی، α نسبت منظر، d قطر تونل و λ فاصله تونل بین دو نانولوله مجاور است. φ_N از رابطه (۳) محاسبه می‌شود^[18]:

$$\varphi_N = f \varphi_f \quad (3)$$

و در آن f از رابطه (۴) محاسبه می‌شود^[18]:

$$f = \frac{\varphi_f^{1/3} - \varphi_p^{1/3}}{1 - \varphi_p^{1/3}} \quad (4)$$

فاز میانی به علت نقشی که در ایجاد شبکه هادی ایفا می‌کند، کسر حجمی موثر نانولوله را افزایش می‌دهد. کسر حجمی فاز میانی برابر است با^[18]:

$$\varphi_i = \varphi_f \left(1 + \frac{t}{R} \right)^2 - \varphi_f \quad (5)$$

که در آن t ضخامت فاز میانی است. در نتیجه برای کسر حجمی موثر نانولوله شامل غلظت نانولوله و فاز میانی رابطه (۶) در مرجع^[18] عنوان شده است:

$$\varphi_{eff} = \varphi_f + \varphi_i = \varphi_f \left(1 + \frac{t}{R} \right)^2 \quad (6)$$

به علاوه، آستانه نفوذ از رابطه (۷) تعیین می‌شود^[18]:

$$\varphi_p = \frac{\pi R^2 l + \frac{4}{3} \pi R^3}{\frac{32}{3} \pi (R+t)^3 \left[1 + \frac{3}{4} \left(\frac{l/u}{R+t} \right) + \frac{3}{32} \left(\frac{l/u}{R+t} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

که در آن u پارامتر اعوجاج است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود^[29]:

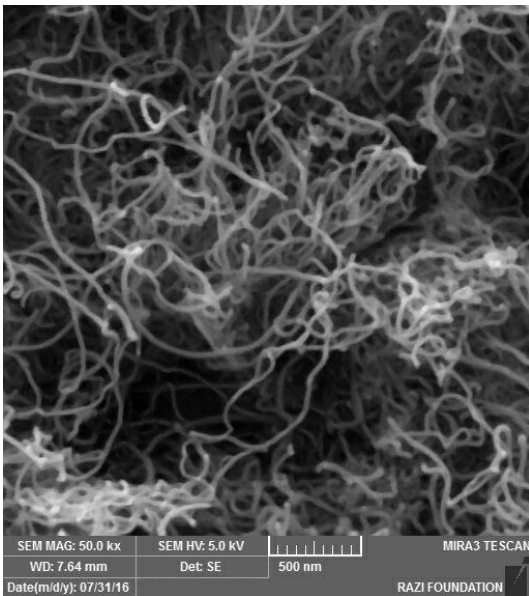
$$u = \frac{l}{l_{eff}} \quad (8)$$

و کسر حجمی نانولوله، آستانه نفوذ و توان b بیان می‌شود. این معادله، با داده‌ها و نتایج تجربی مطابقت دارد، اما توان b در مقالات توصیف و تعریف نشده، به علاوه، در این معادله اثرات فاز میانی، پارامتر اعوجاج و خواص تونل در نظر گرفته نشده است.

مطالعات تجربی متعددی^[21-26] در خصوص آستانه نفوذ و هدایت الکتریکی موثر نانوکامپوزیت با ماتریس پلیمری و افزودنی نانولوله و همچنین تاثیر کسر حجمی روی هدایت الکتریکی انجام گرفته است؛ در مرجع^[21]، نویسندگان نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی با زمینه سیلیکون رابر و افزودنی‌های نانولوله و کربن‌بلک ساخته و به مطالعه خواص مکانیکی آن‌ها از جمله تنش و کرنش پرداخته‌اند. آن‌ها همچنین برای هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده از نمونه‌های تولید شده با درصدهای مختلف نانو، نموداری برازش کرده و معادله آن را استخراج کردند که دقیقاً معادله قانون توانی است. به عبارت دیگر نشان دادند که هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت هیبریدی از قانون توانی تبعیت می‌کند. در مراجع^[22-24] نیز کاری مشابه با^[21]، به ترتیب روی نانوکامپوزیت هیبریدی با زمینه سیلیکون رابر و افزودنی‌های نانولوله و گرافن و نانوکامپوزیت با زمینه سیلیکون رابر و افزودنی نانولوله انجام گرفته است. نویسندگان در مرجع^[25] روشی جدید به منظور ساخت نانوکامپوزیت سیلیکون رابر- پلی‌یورتان گزارش کرده‌اند که در آن از نانولوله به عنوان افزودنی در فوم پلی‌یورتان استفاده شده و در نهایت سختی نمونه‌ها مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. نویسندگان در^[26] نمونه‌های نانوکامپوزیت با زمینه‌های الاستومری مختلف و افزودنی نانولوله را ساخته و به مطالعه برهمکنش نانولوله و زنجیره‌های پلیمری پرداخته‌اند. در مراجع^[27] و^[28] نویسندگان، به ترتیب نمونه‌های نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی با افزودنی‌های کربن‌بلک، نانولوله و گرافیت و نانوکامپوزیت زمینه سیلیکون رابر با افزودنی نانولوله را تولید کرده و هدایت الکتریکی آن‌ها را با آزمون هدایت الکتریکی چهارنقطه‌ای اندازه‌گیری کرده‌اند.

تعداد به مراتب کمتری از مقالات^[18,29,30] به مدل‌سازی تمام پارامترهای دخیل در هدایت الکتریکی پرداخته‌اند. در مقالات^[29,30]، رابطه‌ی نهایی مقاله^[16] مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس آن به توضیح و تفسیر پارامترها و تاثیر هر کدام روی هدایت الکتریکی کامپوزیت پرداخته شده است. همان‌طور که ذکر شد، در مدل‌سازی‌ها عموماً نقش تمام پارامترها در نظر گرفته نشده است. در این مقاله، با توجه به ضعف مدل‌های تئوری برای تخمین هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری با افزودنی نانوتیوب، با تلفیق قانون توانی و رابطه به دست آمده در مرجع^[18]، رابطه‌ای جدید توسعه یافته که در آن، توان b موجود در قانون توانی بر اساس پارامترهای ابعادی، هدایت و اعوجاج نانولوله، پارامترهای شبکه، فاز میانی و خواص تونل توصیف شده و همچنین تاثیر این فاکتورها روی توان b و هدایت الکتریکی

نانولوله‌ها نشان می‌دهد. با توجه به [33,34] و محدوده‌ای که برای هدایت نانوکامپوزیت‌ها ذکر شده، چهار نمونه نانوکامپوزیت با ماتریس پلیمری و افزودنی نانولوله با روش اختلاط ذوبی حالت جامد ساخته شده است که در شکل ۲ به ترتیب نمونه‌های شماره ۲ تا ۵ با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱/۵، ۳، ۳/۵ و نمونه شماره ۱ بدون افزودنی نشان داده شده است. در این روش، مخلوطکن داخلی مدل "Brabender Plasticorder W50" با حجم داخلی ۶۰ cc به کار گرفته شده است. تولید نمونه در شرایط ۲۵ درجه سانتیگراد، ۵۰ دور بر دقیقه، زمان اختلاط ۷ دقیقه و فاکتور پرشدگی: ۰/۷۵ بوده است [35]. پس از انجام این مرحله، می‌بایست نمونه‌ها قالب‌گیری شده و تحت فشار قرار گیرد تا برای تست‌های مورد نظر آماده شوند. به این منظور، قالبی با ابعاد مورد نیاز طراحی و ساخته شد و نمونه‌ها در آن قالب قرار گرفتند. نمونه‌ها ابتدا به مدت سه دقیقه پیش‌گرم شده و در مرحله بعد در دمای ۱۶۰ °C و تحت نیروی ۱۰۰ kN به مدت هفت دقیقه پرس شدند [36]. در نهایت به مدت سه دقیقه نیز تحت فرآیند خنک‌سازی قرار گرفتند. به منظور بررسی سطح نمونه‌های ساخته شده و نحوه توزیع نانولوله در زمینه سیلیکون رابر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی،



شکل ۱) تصویر نانولوله‌های کربنی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی



شکل ۲) تصویر نمونه‌های نانوکامپوزیت ساخته شده به روش ذوبی حالت جامد

کمترین فاصله میان دو سرب یک تیوب منحنی شده، است. به عبارت دیگر $u=1$ یک تیوب مستقیم و صاف را نشان می‌دهد. اعوجاج، تاثیر منفی روی هدایت الکتریکی نانولوله گذاشته و باعث کاهش آن می‌شود (رابطه ۹) [18]:

$$\sigma_{CNT} = \frac{\sigma_f}{u} \quad (9)$$

با جای‌گذاری (۶) در (۴)، کسر حجمی موثر نانولوله حاصل می‌شود [18]:

$$f = \frac{\varphi_{eff}^{1/3} - \varphi_p^{1/3}}{1 - \varphi_p^{1/3}} \quad (10)$$

پس از جای‌گذاری روابط (۱۰) و (۶) در (۳)، رابطه (۱۱) حاصل خواهد شد [18]:

$$\varphi_N = \left(\frac{\varphi_{eff}^{1/3} - \varphi_p^{1/3}}{1 - \varphi_p^{1/3}} \right) \varphi_f \left(1 + \frac{t}{R} \right)^2 \quad (11)$$

با برابر قرار دادن دو رابطه (۱) و (۲) به دست می‌آید:

$$(\varphi_f - \varphi_p)^b = \frac{\varphi_N}{\sigma_f} \left(\frac{1 + 2\alpha\varphi_N}{1 - \varphi_N} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \quad (12)$$

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین معادله (۱۲)، به دست خواهد آمد:

$$b \ln(\varphi_f - \varphi_p) = \ln \left[\frac{\varphi_N}{\sigma_f} \left(\frac{1 + 2\alpha\varphi_N}{1 - \varphi_N} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (13)$$

در نتیجه:

$$b = \frac{\ln \left[\frac{\varphi_N}{\sigma_f} \left(\frac{1 + 2\alpha\varphi_N}{1 - \varphi_N} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \right]}{\ln(\varphi_f - \varphi_p)} \quad (14)$$

معادله (۱۴)، در بیشتر موارد تطابق خوبی با داده‌های تجربی ندارد. به این دلیل که در این معادله، بازدهی شبکه نانولوله به منظور ایجاد یک پل هادی در نانوکامپوزیت در نظر گرفته نشده است. از این رو، پارامتر η (بازده شبکه) به معادله (۱۴) افزوده می‌شود. η عددی بین صفر تا یک است. با توجه به اینکه این پارامتر تابعی از شبکه هادی بوده و شبکه نیز بر اساس نمونه‌های مختلف تغییر می‌کند، پس η نیز یکسان نیست:

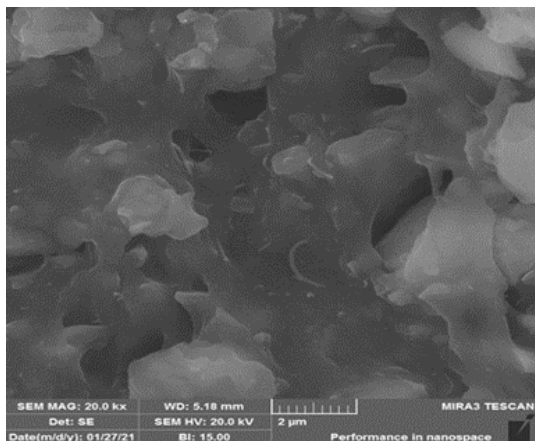
$$b = \frac{\ln \left[\frac{\varphi_N}{\sigma_f} \left(\frac{1 + 2\alpha\varphi_N}{1 - \varphi_N} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \right]}{\ln(\varphi_f - \varphi_p)\eta} \quad (15)$$

و در نهایت با جای‌گذاری روابط (۹) و (۱۵) در (۱)، رابطه نهایی محاسبه هدایت الکتریکی موثر نانوکامپوزیت به دست خواهد آمد:

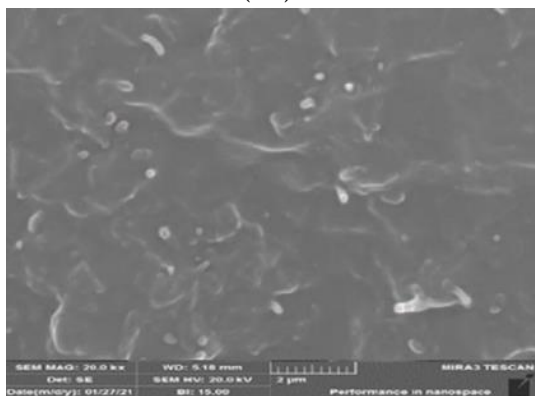
$$\sigma = \sigma_{CNT} (\varphi_{eff} - \varphi_p) \frac{\ln \left[\frac{\varphi_N}{\sigma_{CNT}} \left(\frac{1 + 2\alpha\varphi_N}{1 - \varphi_N} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \right]}{\ln(\varphi_{eff} - \varphi_p)\eta} \quad (16)$$

۳- مواد و آزمون‌ها

POWERSIL 522 نوعی از سیلیکون رابر با ذرات تقویتی سیلیکا و آلومینیوم تری‌هیدرات است که به منظور ساخت نانوکامپوزیت، از شرکت واکر آلمان و نانولوله‌های چنددیواره با نسبت منظر بالا (قطر: ۴۰-۲۰ نانومتر و طول ۱۰-۵ میکرومتر [32]) نیز از شرکت آمریکایی US Research Nanomaterials تهیه شدند. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) را برای

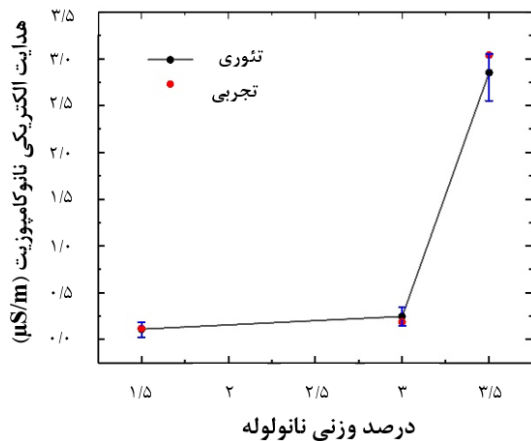


(الف)



(ب)

شکل ۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی برای نمونه‌های نانوکامپوزیت با درصدهای نانولوله (الف) ۰/۵ و (ب) ۳



شکل ۴) مقایسه نتایج تجربی و محاسبات هدایت بر اساس مدل پیشنهادی

جدول ۱) پارامترهای مختلف بر اساس درصد وزنی نانولوله برای محاسبه هدایت الکتریکی بر مبنای مدل پیشنهادی

پارامتر	درصد وزنی نانولوله			
	اختلاف نسبی مقادیر تجربی و تئوری هدایت (%)	σ (S/m)	η	b
۰/۵	۵/۸	۱/۱۱×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۸	۵/۶
۳	۶/۸	۲/۴۷×۱۰ ^{-۷}	۰/۸۸	۶/۱
۳/۵	۶/۲	۲/۹۵×۱۰ ^{-۶}	۰/۶۸	۷/۱

۲۰ دستگاه TeScan-Mira III، استفاده شد. تصاویر در ولتاژ شتابی kV به دست آمدند. هدایت الکتریکی نمونه‌های ساخته شده، با آزمون هدایت حجمی طبق استاندارد IEC 62631-4-1 [37] تعیین شده‌اند. دستگاه مورد استفاده در این آزمون، مدل 610-C SolidState ساخته شرکت Keiyhley Instruments است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری بازه وسیعی از مقاومت‌ها از ۱۰۰ تا ۱۰۱۴ اهم را با دقت بسیار زیاد دارد. به منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌ها، دو روش متداول وجود دارد: دونقطه‌ای و چهارنقطه‌ای. در روش دونقطه‌ای، نمونه بین دو الکترود مسی قرار داده شده و یک جریان مستقیم توسط منبع تولید جریان به الکترودها اعمال می‌شود. اختلاف پتانسیل به وجود آمده توسط همان دستگاه اندازه‌گیری شده و در نتیجه میزان هدایت به دست خواهد آمد. اما در روش چهارنقطه‌ای بعد از اعمال جریان توسط منبع تغذیه، اختلاف پتانسیل به وجود آمده، توسط دستگاه مولتی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. مزیت روش چهارنقطه‌ای آن است که مقاومت تماسی بین الکترودها و نمونه از بین رفته و هدایت الکتریکی به صورت دقیق‌تر تعیین می‌شود. در این مقاله، از روش چهارنقطه‌ای استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آنالیز سطحی

بررسی سطح نمونه‌های نانوکامپوزیت ساخته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی انجام شد. تصاویر FESEM برای دو نمونه نانوکامپوزیت با درصدهای وزنی نانولوله ۰/۵ و ۳ به ترتیب در شکل ۳-الف و ب نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه، نانولوله به طور موثر و یکنواختی در زنجیره‌های پلیمری سیلیکون به دام افتاده و به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. تجمع و تراکم نانولوله‌ها در زمینه، دو مانع بزرگ در رسیدن به یک شبکه نانوکامپوزیت موثر و با بازدهی بالا هستند؛ به نحوی که وجود یک توزیع یکنواخت به طور مستقیم منعکس‌کننده برهم‌کنش پیوند بین مولکول‌های پلیمر و نانولوله است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است در هر دو تصویر هیچ‌گونه تجمع و تراکم وجود ندارد.

۴-۲- صحت‌سنجی رابطه توسعه داده شده با نتایج تجربی

در این بخش نتایج هدایت الکتریکی به دست آمده از رابطه (۱۶) با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. شکل ۴ نتایج تجربی و تئوری هدایت الکتریکی را برای درصدهای بالای ۰/۵ نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مقادیر b ، η و هدایت الکتریکی به همراه درصد اختلاف نسبی محاسبات و نتایج آزمون تجربی هدایت، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش‌بینی‌های به دست آمده از رابطه (۱۶) با داده‌های تجربی تطابق دارند. بنابراین، مدل توسعه داده شده بر اساس خواص شبکه، فاز میانی و اثرات تونل، توانایی تخمین هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت زمینه سیلیکون را داشته

شکل ۶ تاثیر φ_f و R را روی b نشان می‌دهد. در این تحلیل، λ ، d، u و σ_f مانند بخش قبل و طول نانولوله و ضخامت فاز میانی به ترتیب برابر با ۱۵ میکرومتر و ۱/۶ نانومتر در نظر گرفته شده است. تغییرات این فاکتورها b را از ۴ تا ۵/۸ تغییر می‌دهد. b با درصد حجمی ۰/۰۳ و شعاع ۲۰ نانومتر، مقدار ۴ و با درصد حجمی ۰/۰۱ و شعاع ۵ نانومتر، عدد ۵/۸ را نتیجه می‌دهد. غلظت بالای نانولوله با شعاع کم، مقدار b را افزایش می‌دهد. در طرف مقابل، کسر حجمی پایین نانولوله با شعاع زیاد، مقادیر کم b را نتیجه می‌دهد. در نهایت می‌توان گفت φ_f و R به ترتیب رابطه مستقیم و معکوس با b دارند. نویسندگان مرجع [29] نیز نتایج مشابهی از روند تغییرات b بر اساس تغییرات کسر حجمی نانولوله و شعاع آن به دست آورده‌اند؛ البته با توجه به بازه متفاوتی که برای این دو پارامتر در نظر گرفته‌اند طبیعتاً مقادیر به دست آمده برای b با نتایج مقاله پیش رو تفاوت دارد.

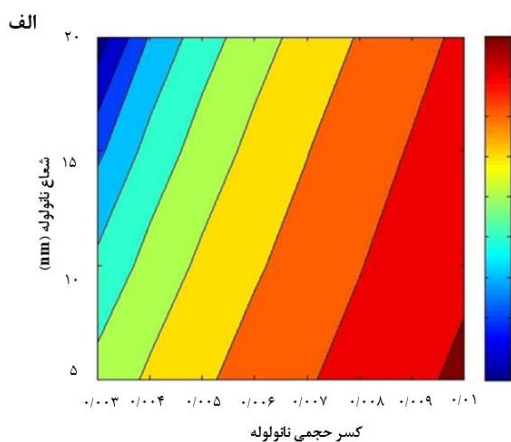
نقش هدایت الکتریکی و اعوجاج نانولوله روی b در شکل ۷ نشان داده شده است؛ که در آن t، λ ، d و مانند بخش قبل، شعاع نانولوله برابر با ۲۰ نانومتر و $\varphi_f = 0/009$ در نظر گرفته شده است. کمترین مقدار b با $u < 1/10$ و هدایت الکتریکی نانولوله بیشتر از $1/70 \times 10^5$ زیمنس بر متر حاصل می‌شود؛ این در حالی است که مقدار بیشینه b در $u > 1/7$ و هدایت نانولوله کمتر از $0/7 \times 10^5$ زیمنس بر متر به دست می‌آید. کمترین مقدار b با مقادیر پایین u

و می‌توان از آن برای مطالعات آینده و به منظور محاسبه و بهینه‌سازی هدایت الکتریکی استفاده کرد.

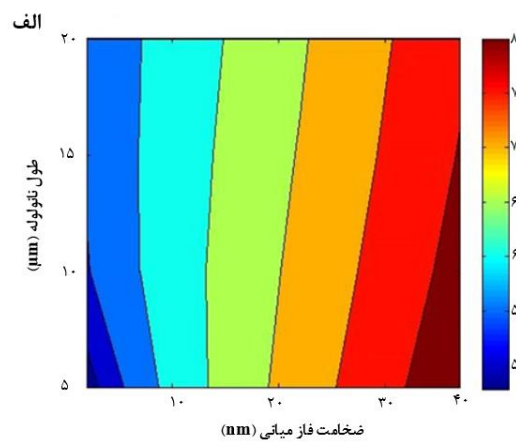
۳-۴- بررسی توان b

تاثیر پارامترهای مختلف روی b (رابطه ۱۵) در این بخش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

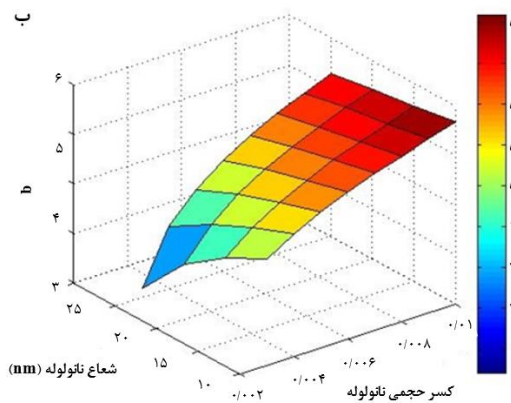
نقش پارامترهای t و l روی b در شکل ۵ آورده شده است. در این بررسی، λ برابر با ۴۵ نانومتر، d برابر ۰/۵ نانومتر، شعاع نانولوله برابر با ۲۰ نانومتر، $\varphi_f = 0/009$ و $u = 1/57$ و هدایت نانولوله برابر با ۱۰۵ زیمنس بر متر در نظر گرفته شده است. بیشترین مقدار b به ترتیب با بیشترین مقدار t و مقادیر کم تا متوسط l به دست می‌آید. به عبارت دیگر b با فاز میانی ضخیم و نانولوله تقریباً کوتاه افزایش می‌یابد. با تغییرات مقادیر t و l، مقدار b بین ۴/۷۸ و ۸ متغیر است. ماکزیمم مقدار b (۸) در t برابر با ۴۰ نانومتر و l بزرگتر از ۱۵ میکرومتر به دست می‌آید؛ در حالی که کمترین مقدار b (۴/۷۸) با t برابر با ۲ نانومتر و طول بزرگتر از ۶ میکرومتر محاسبه می‌شود. ضخامت فاز میانی و طول نانولوله به ترتیب تاثیر مثبت و منفی روی b دارند. در نتیجه می‌توان گفت، فاز میانی ضخیم، b را افزایش داده و نانولوله با طول بلند باعث کاهش b می‌شود. در مرجع [29] نتیجه مشابهی گرفته شده است.



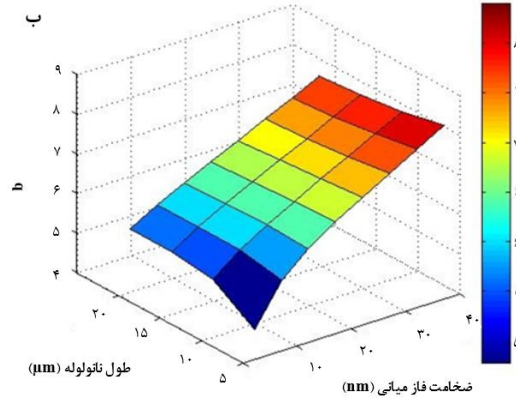
کسر حجمی نانولوله



ضخامت فاز میانی (nm)



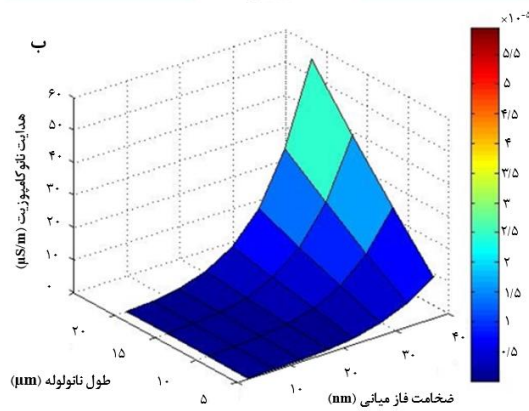
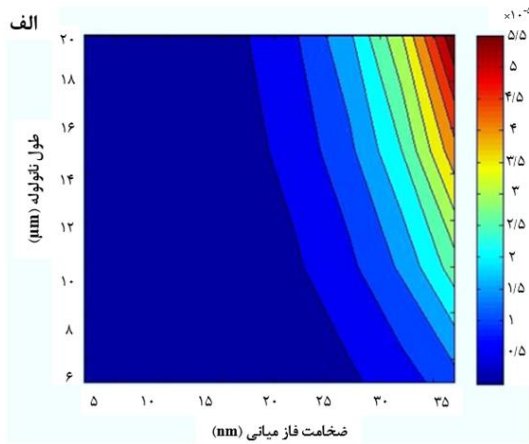
کسر حجمی نانولوله



طول نانولوله (nm)

شکل ۶) منحنی‌های تاثیر پارامترهای φ_f و R روی b: الف) دوبعدی و ب) سه بعدی

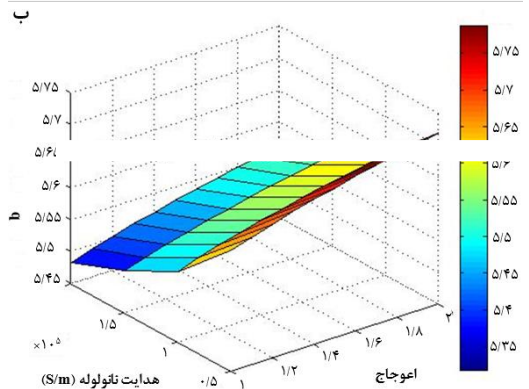
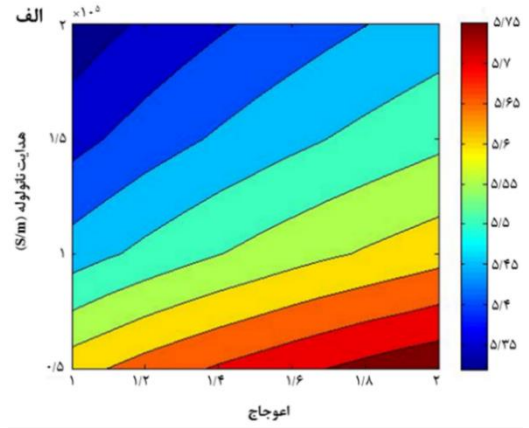
شکل ۵) منحنی‌های تاثیر پارامترهای l و t روی b: الف) دوبعدی و ب) سه بعدی



شکل ۸) منحنی‌های تأثیر پارامترهای t و l در σ : الف) دوبعدی و ب) سه بعدی

در نتیجه، فاز میانی ضخیم نقش مثبتی در هدایت نانوکامپوزیت ایفا می‌کند. می‌توان اینطور گفت که فاز میانی، بازده نانوذرات را برای هدایت افزایش می‌دهد. به بیان دیگر، فاز میانی ضخیم با مشارکت مستقیم در شبکه، غلظت موثر افزودنی و به تبع آن ابعاد شبکه هدایت را تقویت می‌کند. در نتیجه، داشتن یک فاز میانی ضخیم در شبکه نانوکامپوزیت با گسترش شبکه هدایت، باعث تقویت انتقال الکترون‌ها در نانوکامپوزیت خواهد شد. در عین حال، فاز میانی با ضخامت کم توانایی گسترش و اثر بخشی شبکه هدایت و کاهش آستانه نفوذ را ندارد. همچنین، فاز میانی ضخیم، نقش تقویتی در خواص مکانیکی را نیز دارد [38]. نانولوله‌های با طول زیاد با کاهش دادن آستانه نفوذ و ایجاد شبکه هدایت چگال‌تر موجب بهبود هدایت می‌شوند. افزایش طول نانولوله، به دلیل اینکه کسر افزودنی‌های نفوذ کرده در شبکه هادی را بالا می‌برد، ابعاد و غلظت شبکه هدایت را افزایش می‌دهد. مروری بر کارهای گذشتگان نشان می‌دهد که l تأثیر مثبتی نیز روی خواص مکانیکی دارد [39,40].

شکل ۹ تأثیر φ_f و R را روی هدایت نانوکامپوزیت نمایش می‌دهد. بر اساس محاسبات، هدایت الکتریکی $2/5$ میکروزیمنس بر متر، با کسر حجمی 0.01 و شعاع 5 نانومتر به دست می‌آید؛ در حالی که مقادیر کسر حجمی کمتر از 0.0053 کمترین میزان هدایت را نشان



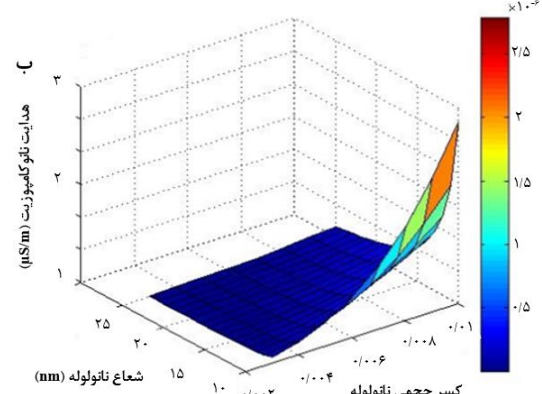
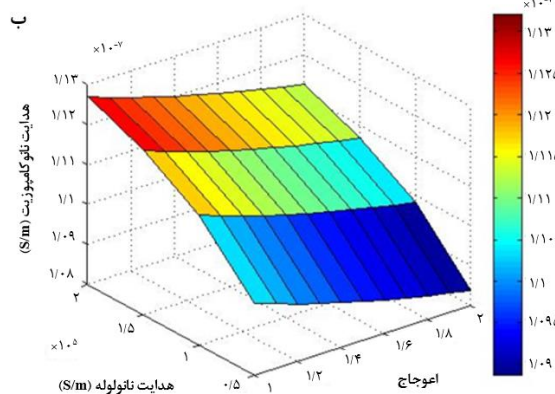
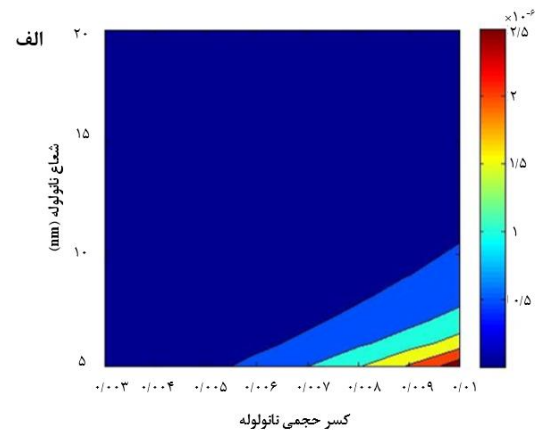
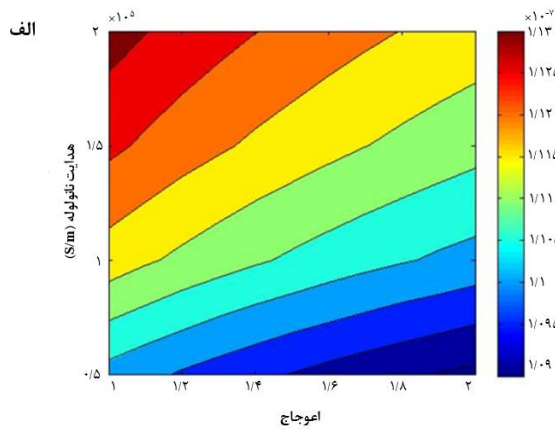
شکل ۹) منحنی‌های تأثیر پارامترهای σ_f و l روی b : الف) دوبعدی و ب) سه بعدی

و مقادیر بالای σ_f حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان گفت اعوجاج و هدایت الکتریکی نانولوله به ترتیب رابطه مستقیم و عکس با b دارند. زمانی که نانولوله‌ها صاف و مستقیم باشند، b با کاهش هدایت الکتریکی نانولوله افزایش می‌یابد. نانولوله صاف همانند هدایت الکتریکی بالای نانولوله، مقادیر پایین b و نانولوله خمیده و پیچ و تاب‌دار همانند تأثیر هدایت الکتریکی پایین نانولوله، مقادیر بالای b را به دست می‌دهد.

۴-۴- بررسی هدایت الکتریکی

در این بخش نقش پارامترهای بحث شده در بخش قبل، روی هدایت الکتریکی (رابطه ۱۶) بررسی شده است.

شکل ۸ هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت را به عنوان تابعی از t و l مشخص کرده است (مقادیر پارامترهای دیگر مانند بخش تأثیر t و l روی b ، در نظر گرفته شده است). مقادیر کم این پارامترها هدایت را کاهش داده اما مقادیر بالا، باعث افزایش آن می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود هدایت 50 میکروزیمنس بر متر، در t برابر 40 نانومتر و l بیشتر از 19 میکرومتر به دست می‌آید؛ در حالی که فاز میانی در ضخامت‌های کمتر از 19 نانومتر توانایی افزایش هدایت الکتریکی سیلیکون را ندارد. بنابراین ضخامت فاز میانی و طول نانولوله رابطه مستقیم با هدایت الکتریکی دارند. به بیان دیگر، به منظور رسیدن به هدایت الکتریکی قوی، به یک فاز میانی ضخیم‌تر نیاز است. در حقیقت فاز میانی ضخیم، نانولوله‌ها را به هم رسانده و باعث گستردگی و چگالی بیشتر شبکه هدایت می‌شود.



شکل ۱۰) منحنی های تأثیر نقش پارامترهای σ_f و u در σ : الف) دویبعدی و ب) سه بعدی

شکل ۹) منحنی های تأثیر پارامترهای ϕ_f و R در σ : الف) دویبعدی و ب) سه بعدی

بالای $1/8 \times 10^5$ زیمنس بر متر به همراه $u=1$ و هدایت نانولوله برابر با 0.5×10^5 زیمنس بر متر به همراه $u > 1/9$ ایجاد می شود. در نتیجه، هدایت الکتریکی و اعوجاج نانولوله توانایی تأثیر روی هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت را دارند. بیشترین مقدار هدایت نانوکامپوزیت متناسب با بیشترین مقدار هدایت نانولوله و کمترین اعوجاج آن است در حالی که کمترین هدایت نانوکامپوزیت با وجود بیشترین مقدار اعوجاج و کمترین مقدار هدایت نانولوله ایجاد می شود. اعوجاج نانولوله، توانایی تغییر ابعاد شبکه هدایت را دارد؛ به بیان دیگر نانولوله خمیده و با اعوجاج زیاد، طول موثر نانولوله ها را کاهش داده و به تبع آن شبکه را کوچک می کند و نانولوله صاف و مستقیم، با افزایش طول موثر نانولوله، ابعاد شبکه را زیاد می کند. پس، به منظور رسیدن به هدایت بالای نانوکامپوزیت باید حتی الامکان از ایجاد اعوجاج در نانولوله جلوگیری کرد. نتیجه گیری مشابهی در مراجع [4,5] گزارش شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با ارتباط قانون توانی و مدلی توسعه یافته برای هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت با ماتریس پلیمری و افزودنی نانولوله کربنی، توان b به لحاظ فیزیکی توصیف و ارتباط آن با خواص نانوذرات و فاز میانی بیان شد. به علاوه، مدلی به منظور

می دهد. مقادیر بسیار کم ϕ_f توانایی افزایش هدایت نانوکامپوزیت را ندارد در حالی که مقادیر بالای ϕ_f توام با مقادیر کم R ، بیشترین هدایت الکتریکی را ایجاد می کند. به عبارت دیگر، غلظت بالای نانولوله های نازک بهترین و بیشترین هدایت را ایجاد کرده اما غلظت پایین نانوذرات هیچ گونه تغییری در هدایت زمینه پلیمری ایجاد نمی کند.

کسر حجمی بالای نانوذرات، هدایت نانوکامپوزیت را زیاد می کند زیرا نانوذرات می توانند شبکه بزرگی را بالای آستانه نفوذ تشکیل دهند که به راحتی توانایی انتقال الکترون و به تبع آن هدایت بالا را دارند. در حالی که مقادیر کم نانولوله توانایی تولید شبکه و تأثیر روی هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت را ندارد. نانولوله نازک در قدم اول آستانه نفوذ را کاهش می دهد که باعث افزایش هدایت الکتریکی در درصدهای پایین افزودنی خواهد شد. در قدم بعد، مقدار نانولوله نفوذ کرده در شبکه با کاهش شعاع نانولوله افزایش می یابد. بنابراین، اثربخشی نانولوله نازک به مراتب بیش از نانولوله قطور است. نقش مثبت نانولوله های نازک روی خواص فازی در مطالعات گذشته بررسی شده است [41].

شکل ۱۰ تغییرات هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت را بر حسب اعوجاج و هدایت نانولوله نشان می دهد. بیشترین و کمترین هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت به ترتیب در مقادیر هدایت نانولوله

کسر حجمی	ϕ
ضریب منظر	α
بازده شبکه	η
فاصله تونل بین دو نانولوله مجاور	λ
زیرنویس‌ها	
آستانه نفوذ	p
نانولوله	f
نانولوله‌های شرکت‌کننده در ایجاد شبکه	N
فاز میانی	i
موثر	eff

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: مقاله حاضر با رعایت تمامی اصول اخلاقی ثبت گردیده است و محتویات علمی مقاله، حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج بر عهده آن‌هاست.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Calisi N, Salvo P, Melai B, Paoletti C, Pucci A, Di Francesco F. Effects of thermal annealing on SEBS/MWCNTs temperature-sensitive nanocomposites for the measurement of skin temperature. *Materials Chemistry and Physics*. 2017; 186:456-61.
- Sobkowiak M, Rebis T, Milczarek G. Electrocatalytic sensing of poly-nitroaromatic compounds on multiwalled carbon nanotubes modified with alkoxy-sulfonated derivative of PEDOT. *Materials Chemistry and Physics*. 2017; 186:108-14.
- da Silva JP, Soares BG, Livi S, Barra GM. Phosphonium-based ionic liquid as dispersing agent for MWCNT in melt-mixing polystyrene blends: Rheology, electrical properties and EMI shielding effectiveness. *Materials Chemistry and Physics*. 2017; 189:162-8.
- Zare Y, Rhee KY. Development of an advanced Takayanagi equation for the electrical conductivity of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2021:110191.
- Zare Y, Rhee KY. The mechanical behavior of CNT reinforced nanocomposites assuming imperfect interfacial bonding between matrix and nanoparticles and percolation of interphase regions. *Composites Science and Technology*. 2017; 144:18-25.
- Banks-Sills L, Shiber DG, Fourman V, Eliasi R, Shlayer A. Experimental determination of mechanical properties of PMMA reinforced with functionalized CNTs. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 95:335-45.
- Zare Y, Garmabi H, Rhee KY. Prediction of complex modulus in phase-separated poly (lactic acid)/poly (ethylene oxide)/carbon nanotubes nanocomposites. *Polymer Testing*. 2018; 66:189-94.

تخمین هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت توسعه داده شد که نتایج نشان از تطابق داده‌های حاصل از مدل و آزمون تجربی دارد. نتیجه‌گیری‌های زیر را می‌توان از این تحقیق به دست آورد:

- افزایش ۳ برابری کسر حجمی (از ۰/۰۰۳ به ۰/۰۱) و همزمان کاهش ۴ برابری شعاع نانولوله (از ۲۰ نانومتر به ۵ نانومتر)، افزایش ۴۵ درصدی b را در پی دارد.
- افزایش ۲۰ برابری ضخامت فاز میانی (از ۲ نانومتر به ۴۰ نانومتر) و همزمان افزایش ۲/۵ برابری طول نانولوله (از ۶ میکرومتر به ۱۵ میکرومتر) نیز، افزایش ۶۷ درصدی b را به دست می‌دهد.
- به طور کلی، افزایش مقادیر کسر حجمی (ϕ_f) ، ضخامت فاز میانی (t) و اعوجاج (u) و کاهش طول (l) ، شعاع (R) و هدایت نانولوله (σ_f) باعث افزایش مقدار b می‌شود. بنابراین، b ارتباط متفاوتی با خواص مختلف نانوذرات و فاز میانی دارد.
- با افزایش مقادیر ضخامت فاز میانی، طول نانولوله، کسر حجمی نانولوله و هدایت الکتریکی آن و کاهش شعاع نانولوله و اعوجاج آن، بیشترین هدایت حاصل می‌شود.
- فاز میانی در ضخامت‌های کمتر از ۱۹ نانومتر توانایی افزایش هدایت الکتریکی سیلیکون را ندارد.
- با افزایش ۲ برابری اعوجاج و همزمان کاهش ۳/۶ برابری هدایت نانولوله، کاهش ۵٪ در هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت (از $1/13 \times 10^{-7}$ زیمنس بر متر به $1/0.8 \times 10^{-7}$ زیمنس بر متر) حاصل می‌شود.
- مقادیر بسیار پایین کسر حجمی نانولوله، توانایی افزایش هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت را ندارد اما افزایش کسر حجمی همراه با کاهش شعاع نانولوله، هدایت قابل توجهی ایجاد می‌کند.
- به طور کلی غلظت زیاد نانولوله‌های بلند و نازک، فازمیانی ضخیم، اعوجاج کم نانولوله و هدایت الکتریکی بالای آن می‌تواند هدایت بالای نانوکامپوزیت را ایجاد کند.
- از میان فاکتورهای مختلف، ضخامت فازمیانی و طول نانولوله دو پارامتری هستند که بیشترین تاثیر را روی هدایت نانوکامپوزیت گذاشتند.

فهرست علائم

d	قطر تونل
f	درصد نانولوله‌های شرکت‌کننده در ایجاد شبکه
t	ضخامت فاز میانی
R	شعاع نانولوله
l	طول نانولوله
u	پارامتر اعوجاج
علائم یونانی	
σ	هدایت الکتریکی

- 22- Yang H, Yao X, Yuan L, Gong L, Liu Y. Strain-sensitive electrical conductivity of carbon nanotube-graphene-filled rubber composites under cyclic loading. *Nanoscale*. 2019;11(2):578-86.
- 23- Lee KS, Phiri I, Kim SH, Oh K, Ko JM. Preparation and Electrical Properties of Silicone Composite Films Based on Silver Nanoparticle Decorated Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Materials*. 2021;14(4):948.
- 24- Li ZW. Thermoelectric properties of carbon nanotube/silicone rubber composites. *Journal of Experimental Nanoscience*. 2017;12(1):188-96.
- 25- Nabeel M, Varga M, Kuzsela L, Filep Á, Fiser B, Viskolcz B, Kollar M, Vanyorek L. Preparation of Bamboo-Like Carbon Nanotube Loaded Piezoresistive Polyurethane-Silicone Rubber Composite. *Polymers*. 2021;13(13):2144.
- 26- Ponnamma D, Sadasivuni KK, Grohens Y, Guo Q, Thomas S. Carbon nanotube based elastomer composites—an approach towards multifunctional materials. *Journal of Materials Chemistry C*. 2014;2(40):8446-85.
- ۲۷- بیات م و صفائی ج و ملازاده بیدختی س، طراحی سیستم خیره فازی برای تخمین و بهینه سازی هدایت الکتریکی کامپوزیت سیلیکون/ نانولوله- های کرینی چند دیواره با هدف توسعه و ساخت الکترودهای خشک فعال الکتروانسفالوگرافی، کنگره مشترک سیستم‌های فازی و هوشمند ایران نوزدهمین کنفرانس سیستم‌های فازی و هفدهمین کنفرانس سیستم‌های هوشمند، مشهد، ۱۳۹۹.
- 28- tabatabaee, M., Taheri-Behrooz, F., razavi, S., liaghat, G. Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites using nanoparticles. *Journal of Science and Technology of Composites*, 2019; 5(4): 605-614. doi: 10.22068/jstc.2018.93235.1471
- 29- Zare Y, Rhee KY. Definition of “b” exponent and development of power-law model for electrical conductivity of polymer carbon nanotubes nanocomposites. *Results in Physics*. 2020;16:102945.
- 30- Tang ZH, Li YQ, Huang P, Fu YQ, Hu N, Fu SY. A new analytical model for predicting the electrical conductivity of carbon nanotube nanocomposites. *Composites Communications*. 2021;23:100577.
- 31- Kim YJ, Shin TS, Do Choi H, Kwon JH, Chung YC, Yoon HG. Electrical conductivity of chemically modified multiwalled carbon nanotube/epoxy composites. *Carbon*. 2005;43(1):23-30.
- 32- <https://nanosadra.com/productsdatasheet.pdf/>
- 33- Wei X, Jia Z, Sun Z, Liao W, Qin Y, Guan Z, Xu Z, Peng X. Study of anti-icing performance of insulator strings bottom-coated with semiconductive silicone rubber coating. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2012;19(6):2063-72.
- 34- Liao W, Jia Z, Guan Z, Wang L, Yang J, Fan J, Su Z, Zhou J. Reducing ice accumulation on insulators by applying semiconducting RTV silicone coating. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2007;14(6):1446-54.
- 35- Kapdi AR, Maiti D, editors. Strategies for palladium-catalyzed non-directed and directed C bond H bond functionalization. Elsevier; 2017, 1-486.
- 36- <https://www.wacker.com/cms/en-us/siliconerubber.pdf>, Last access Nov. 5, 2021.
- 8- Yusupov K, Zakhidov A, You S, Stumpf S, Martinez PM, Ishteev A, Vomiero A, Khovaylo V, Schubert U. Influence of oriented CNT forest on thermoelectric properties of polymer-based materials. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018 ;741:392-7.
- 9- Zare Y, Rhee KY. Micromechanics Modeling of Electrical Conductivity for Polymer Nanocomposites by Network Portion, Interphase Depth, Tunneling Properties and Wettability of Filler by Polymer Media. *Fibers and Polymers*. 2021;22(5):1343-51.
- 10- Zare Y, Rhee KY. Electrical conductivity of interphase zone in polymer nanocomposites by carbon nanotubes properties and interphase depth. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021;138(17):50313.
- 11- Zare Y, Rhee KY. Advancement of a model for electrical conductivity of polymer nanocomposites reinforced with carbon nanotubes by a known model for thermal conductivity. *Engineering with Computers*. 2020:1-1.
- 12- Radzuan NA, Sulong AB, Sahari J. A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite. *international journal of hydrogen energy*. 2017;42(14):9262-73.
- 13- Vargas-Bernal R, Herrera-Pérez G, Calixto-Olalde M, Tecpoyotl-Torres M. Analysis of DC electrical conductivity models of carbon nanotube-polymer composites with potential application to nanometric electronic devices. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013;2013.
- 14- Neffati R, Brokken-Zijp JM. Electric conductivity in silicone-carbon black nanocomposites: percolation and variable range hopping on a fractal. *Materials Research Express*. 2019;6(12):125058.
- 15- Kumar V, Alam MN, Manikkavel A, Song M, Lee DJ, Park SS. Silicone rubber composites reinforced by carbon nanofillers and their hybrids for various applications: A review. *Polymers*. 2021;13(14):2322.
- 16- Deng F, Zheng QS. An analytical model of effective electrical conductivity of carbon nanotube composites. *Applied Physics Letters*. 2008;92(7):071902.
- 17- Takeda T, Shindo Y, Kuronuma Y, Narita F. Modeling and characterization of the electrical conductivity of carbon nanotube-based polymer composites. *Polymer*. 2011;52(17):3852-6.
- 18- Takeda T, Shindo Y, Kuronuma Y, Narita F. Modeling and characterization of the electrical conductivity of carbon nanotube-based polymer composites. *Polymer*. 2011;52(17):3852-6.
- 19- Zelinka SL, Glass SV, Stone DS. A Percolation Model for Electrical Conduction in Wood with Implications for Wood-Water Relations, *Wood Fiber Science*, 2008, 40, 544-552.
- 20- Wang SF, Ogale AA. Simulation of percolation behavior of anisotropic short-fiber composites with a continuum model and non-cubic control geometry. *Composites science and technology*. 1993;46(4):389-98.
- 21- Song P, Song J, Zhang Y. Stretchable conductor based on carbon nanotube/carbon black silicone rubber nanocomposites with highly mechanical, electrical properties and strain sensitivity. *Composites Part B: Engineering*. 2020;191:107979.

- 37- Standard Test Method for Dielectric and Resistive Properties of Solid Insulating Materials-Part 3-1: Determination of Resistive Properties (DC methods)- Volume Resistance and Volume Resistivity-General Method, Annual Book of IEC Standard, IEC 62631-4-1, 2016.
- 38- Ghasemzadeh H, Akbari Jalalabad E. Computing the Compressive Strength of Cement Composite Reinforced with Carbon Nanotube Assuming Isotropic Behavior for CNT. *Modares Civil Engineering journal*. 2012;12(1):0-.
- 39- Babazade A, Hadad M, Safarabadi M. Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2021;7(4):1197-206.
- 40- Rikhtegar F, Shabestari S, Saghafian H. Investigation of microstructure and mechanical properties of Al₂O₃-CNT nanocomposite produced by flake powder metallurgy process. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2017;4(1):91-100.
- 41- Chen L, Ozisik R, Schadler LS. The influence of carbon nanotube aspect ratio on the foam morphology of MWNT/PMMA nanocomposite foams. *Polymer*. 2010;51(11):2368-75.