



بررسی اثر نانو ذرات فوم سیلیکا بر خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی کامپوزیت پلیمری اپوکسی / فوم سیلیکا

رضا سرخوش^{۱*}، محمد کاظمی نصرآبادی^۱، رضا پارسافر^۲

۱- عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۴ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

فوم سیلیکا

نانوذرات پرکننده

خواص مکانیکی و الکتریکی

ثابت دی الکتریک

تانژانت تلفات

نانوذرات فوم سیلیکا در بسیاری از صنایع از جمله صنایع هوافضا، ساختمانی، حمل و نقل، بهداشتی و غیره به عنوان پرکننده مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به سبکی، خواص عایق حرارتی، استحکام فشاری مناسب و کاربرد این پرکننده به عنوان افزایش دهنده ویسکوزیته رزین به منظور چسب اتصال قطعات مختلف در صنعت هوافضا، در این مقاله به بررسی اثر پرکننده نانوذرات فوم سیلیکا بر روی خواص مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت پلیمری اپوکسی/ فوم سیلیکا پرداخته شده است. به منظور دستیابی به خواص بهینه، نمونه هایی با درصد وزنی مختلف ساخته شد. در ادامه جهت تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت های تولید شده، آزمون کشش و آزمون خمش سه نقطه ای و به جهت تعیین خواص الکتریکی، آزمون ثابت دی الکتریک انجام شد. در پایان خواص مکانیکی و الکتریکی نمونه ها با درصد وزنی مختلف با رزین اپوکسی خالص مقایسه شد. نتایج نشان داد که بیشینه استحکام کششی رزین خالص، فوم سیلیکا ۵ و ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با ۱۸، ۱۶ و ۱۰ مگاپاسکال است. بیشینه استحکام خمشی برای رزین خالص، فوم سیلیکا ۵ و ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با ۱۰۹، ۸۵ و ۶۷ مگاپاسکال به دست آمد. بیشینه ثابت دی الکتریک اندازه گیری شده برای رزین خالص، فوم سیلیکا ۵ و ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با ۲/۹۵، ۲/۹۷ و ۳/۰۹، بدست آمد. بیشینه تانژانت تلفات برای رزین اپوکسی، فوم سیلیکا ۵ و ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با ۰/۱۶، ۰/۱۷ و ۰/۲۳ اندازه گیری شد. نتایج خواص الکتریکی حاکی از آن است که افزودن پرکننده فوم سیلیکا به رزین، تاثیر منفی بر روی خواص الکتریکی آن نداشته است.

Study of the effect of fumed silica on mechanical, electrical, and magnetic properties of epoxy/ fumed silica composite

Reza Sarkhosh^{1*}, Mohammad Kazemi Nasrabadi¹, Reza Parsafar²

1- Faculty Member, Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- MSc Graduate, Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 25 November 2023

Accepted: 6 May 2024

Keywords:

Fumed Silica

Nanoparticles Filler

Mechanical And Electrical Properties

Dielectric Constant

Loss Tangent

Abstract

Fumed Silica nanoparticles are widely used as fillers in various industries such as aerospace, building, transportation, health, and more. Considering the lightweight, thermal insulation properties and suitable compressive strength and, the use of this filler as an increaser of resin viscosity to glue different parts in the aerospace industry, in this study, the effect of Fumed silica nanoparticles filler on the mechanical and electrical properties of epoxy/Fumed silica polymer Nano composite has been investigated. To achieve optimal properties, samples with different weight percentages were made. To determine the mechanical properties of the produced composites, the tensile test and the three-point bending test were performed, and to determine the electrical properties of the samples, the dielectric constant test was performed. In the end, the mechanical and electrical properties of the samples with different weight percentages were compared with the pure epoxy resin sample. The results showed that the maximum tensile strength of pure resin samples, Fumed silica 5% and 9% are 18, 16, and 10 MPa, respectively. The maximum flexural strength for pure resin, Fumed silica 5%, and 9% were 109, 85, and 67 MPa, respectively. The maximum dielectric constant measured for pure resin, Fumed silica 5% and 9% were obtained as 2.95, 2.97, and 3.09 respectively. The maximum Loss tangent measured for pure resin, Fumed silica 5% and 9% were obtained as 0.16, 0.17, and 0.23 respectively. The results of electrical properties indicate that the addition of Fumed silica filler to the resin did not affect the electrical properties of the resin.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sarkhosh R, Kazemi Nasrabadi M, Parsafar R. Study of the effect of fumed silica on mechanical, electrical, and magnetic properties of epoxy/ fumed silica composite. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 April 20;11(2):37-57. doi: 10.22034/IJME.2024.426954.1879 [In Persian]

۱- مقدمه

نانوکامپوزیت نیز مانند کامپوزیت‌ها از دو یا چند فاز تشکیل می‌گردند. فاز اول فاز زمینه نانوکامپوزیت و فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر می‌باشد. در نانوکامپوزیت تقویت کننده به‌منظور اهداف خاص نظیر افزایش مقاومت، هدایت الکتریکی، استحکام، افزایش لزجت و غیره استفاده می‌گردد. هر چه ذرات یا الیاف درون ماده زمینه توزیع یکنواخت‌تری داشته باشد، نیروی‌های اعمالی به کامپوزیت به صورت یکنواخت‌تری به تقویت‌کننده‌ها انتقال می‌یابد. با توزیع مناسب مواد تقویت کننده درون ماده زمینه خصوصیات کامپوزیت تولید شده مانند استحکام، سفتی، انرژی شکست، هدایت الکتریکی و غیره بهبود می‌یابد [۱]. پلیمرهای پایه اپوکسی به خاطر انعطاف‌پذیری و خواص مناسب، به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف نظیر هوافضا، کشتی‌سازی، خودروسازی و غیره به کار می‌رود [۲، ۳]. این پلیمرها علی‌رغم خواص فیزیکی و مکانیکی ویژه‌ای که برخوردار است به دلیل عواملی نظیر شکنندگی، مقاومت کم در رشد ترک و استحکام کم موجب شده است تا پژوهش‌ها به سمت تولید تقویت کننده‌های آلی و غیر آلی سوق داده شود. مواد گوناگونی همچون شن، نانولوله‌های کربنی، نانوصفحات گرافنی، نانومواد سیلیکا یا اکسید گرافن به‌زمینه پلیمرهای ترموست اضافه شده‌اند [۴]. در دهه‌های اخیر تحقیقاتی با هدف اثر نانو ذرات سیلیکا بر روی خواص مکانیکی و حرارتی زمینه کامپوزیت انجام شده است. چن و همکاران [۵]، ما و همکاران [۶] و لیانگ و همکاران [۷] در پژوهش‌هایی به بهبود خواص مکانیکی رزین اپوکسی با اضافه کردن نانوذرات سیلیکا به زمینه پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزودن مقدار اندک نانوذرات سیلیکا به زمینه‌ی اپوکسی، استحکام و چقرمگی زمینه افزایش یافته است؛ اما اضافه نمودن مقادیر بیشتر نانوذرات سیلیکا، منجر به کاهش استحکام و چقرمگی می‌شود. لیانگ و همکاران از دو نوع نانوسیلیکا با ابعاد ۲۰ و ۸۰ نانومتری برای ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی-سیلیکا استفاده کردند. آن‌ها نمونه‌ها را با حداکثر ۱۷٫۴ درصد جرمی ساختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اندازه نانوذرات اثری روی مدول، تنش تسلیم و چقرمگی نداشت. آن‌ها با افزایش مقدار نانو ذره تا حدود ۷ درصد حجمی، افزایش مدول را ملاحظه کردند و پس از آن تقریباً تغییر قابل ملاحظه‌ای، مشاهده نکردند. علی‌رغم پخش مناسب، افزودن نانوذرات اثری بر روی تنش تسلیم فشاری نداشت. همچنین افزایش مقدار نانوذرات موجب افزایش چقرمگی گردید که این روند تا درصد حجمی ۱۷/۴ ادامه داشت. بارابانوا و همکاران [۸] جهت افزایش دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی/سیلیکا را ساختند و موفق به افزایش ۳۱ درجه سانتی‌گرادی دمای انتقال شیشه‌ای زمینه شدند. دیتانت و همکارانش [۹] اثر افزودن نانوذرات سیلیکا با اندازه ذرات مختلف به رزین اپوکسی را بررسی کرده و تاثیر مقدار و اندازه ذرات سیلیکا را روی پارامترهایی چون مدول یانگ، تنش تسلیم، چقرمگی و انرژی شکست مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا تاثیر به‌سزایی روی تنش تسلیم رزین اپوکسی ندارد. البته باید به این نکته اشاره کرد در مورد رفتار تنش تسلیم اپوکسی با وجود ذرات سیلیکا، تفاوت‌هایی در نتایج تحقیق پژوهش‌گران وجود دارد. زاپالرتو و همکاران [۱۰] خلاف این موضوع را نشان می‌دهد. همچنین کاواکوچی و همکاران [۱۱] در مقایسه‌ی یک سیستم اپوکسی مشابه با کار [۹]، با افزودن ذرات سیلیکا با قطر ۴۲ میکرو، افزایش تنش تسلیم را مشاهده کردند. آن‌ها چسبندگی بین ذرات و اپوکسی را علت این مشاهدات در نظر گرفتند. برای سیستم‌هایی که با برهمکنش ضعیف بین زمینه و ذرات، ذرات قادر به تحمل بار خارجی نخواهد بود و استحکام کامپوزیت از استحکام پلیمر خالص کمتر خواهد بود. تانگ و همکاران [۱۲] با هدف بهبود خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی و تقویت‌کننده‌های اکسید گرافن و سیلیکا را تولید کردند. پل و همکاران [۱۳] اثر نانورس و نانوسیلیکا را روی خواص کششی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با ۱۲ لایه شیشه بافته شده به‌صورت دو بعدی با کسر حجمی الیاف ۴۰ درصد و با روش ساخت لایه‌چینی دستی بررسی کردند. در کار آن‌ها درصد جرمی نانوسیلیکا شامل مقادیر ۰، ۰/۵، ۱ و ۳ بوده است. خواص بررسی شده توسط آن‌ها عبارتند از: مدول، استحکام، کرنش شکست و چقرمگی. طبق نتایج این پژوهش، بالاترین بهبودهای بدست آمده برای نانوسیلیکا عبارتند از: ۱۵ درصد افزایش مدول در ۳ درصد نانوسیلیکا، ۱۰ درصد افزایش استحکام در ۰/۵ درصد نانوسیلیکا، ۱۴ درصد افزایش کرنش شکست در ۰/۵ درصد سیلیکا و ۲۷ درصد افزایش چقرمگی در ۰/۵ درصد نانوسیلیکا. زاپالرتو و همکارانش [۱۰] اثر نانوسیلیکا را بر روی اپوکسی با دو روش پخت و با آزمایش‌های کشش ساده، کشش نمونه دندانه‌دار و نمونه استخوان شکل بررسی کردند. در این پژوهش به بررسی مدول الاستیسیته، تنش گسیختگی، کرنش گسیختگی و چقرمگی پرداخته شده است. در هر دو حالت پخت، افزایش چقرمگی مشاهده شده است ولی استحکام در یکی از حالات کاهش می‌یابد. برای روش پخت اول ۳۵ درصد افزایش چقرمگی در ۵ درصد جرمی و برای روش پخت دوم ۶۰ درصد افزایش چقرمگی در ۸ درصد جرمی گزارش کردند. آلنی و

همکاران [۱۴] اثر نانوسیلیکا روی چقرمگی مود دوم شکست بین لایه‌ای کامپوزیت شیشه/اپوکسی را به‌طور تجربی و با آزمایش خمش با شکاف انتهایی بررسی کردند. با توجه به نمودار نیرو-جابجایی، بهترین نتایج مربوط به ۵ درصد جرمی نانوسیلیکا می‌باشد که در آن چقرمگی مود دوم ۳۶ درصد افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در مورد اثر فوم سیلیکا بر روی خواص مکانیکی و حرارتی فاز زمینه انجام شده است. دوراما و همکاران [۱۵] اثر افزودن و مقدار نانوذرات فوم سیلیکا را به اپوکسی بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، افزودن نانوذرات فوم سیلیکا به اپوکسی، باعث افزایش مدول یانگ شده و همچنین با افزایش مقدار ذرات نیز، مدول یانگ افزایش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که با افزودن ۳۰ درصد جرمی نانوذرات فوم سیلیکا به اپوکسی، مقدار مدول یانگ ۸۳ درصد افزایش می‌یابد. رتاریو-ساودرا و همکاران [۱۶] اثر میزان پرکننده فوم سیلیکا را بر پایداری حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی بررسی کردند. آن‌ها پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها را در دو حالت بدون کاهش وزن پرکننده و با کاهش وزن پرکننده مورد بررسی قرار دادند. در حالت اول، یعنی بدون در نظر گرفتن کاهش وزن پرکننده، به این نتیجه رسیدند که پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها بهبود یافته و با افزایش میزان فوم سیلیکا، نرخ کاهش وزن کاهش می‌یابد. در حالی که پس از کاهش وزن پرکننده، رفتار تخریب حرارتی رزین فقط مقدار اندکی تحت تأثیر میزان پرکننده بوده است. باتیستلا و همکاران [۱۷] رفتار شکست نانوکامپوزیت‌های فوم سیلیکا/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که چقرمگی شکست به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. پرگنلا و همکاران [۱۸] نانوکامپوزیت فوم سیلیکا/اپوکسی را از دیدگاه حرارتی-مکانیکی مورد مطالعه قرار دادند. کاهش خواص حرارتی-مکانیکی مانند دمای انتقال شیشه‌ای و مدول کششی مشاهده شد. علت این مشاهدات، محدود شدن درجه اتصالات عرضی تشکیل شده در حین فرایند پخت زمینه، به دلیل افزایش برهم‌کنش پلیمر-پرکننده است. اما با افزایش میزان پرکننده، خواص رفتار برعکس از خود نشان می‌دهند که دلیل آن می‌تواند تحولات فیزیکی بهبود یافته باشد که بستر پلیمری در آستانه نفوذ پرکننده تجربه می‌کند. فنگ جینپنگ و همکاران [۱۹] پایداری حرارتی کامپوزیت‌های عایق حرارتی مبتنی بر فوم سیلیکا در دماهای بالا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌ها می‌توانند پایداری حرارتی عالی را در دمای زیر ۸۰۰ درجه سانتیگراد حفظ کنند. دوریگاتو آندرا و همکاران [۲۰] خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های فوم سیلیکا/پلی‌اتیلن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش سطح سیلیس، تجمع نانو پرکننده بارزتر است، در حالی که پراکندگی نانو پرکننده با عملکرد مناسب پرکننده بهبود می‌یابد. لورنزاتی آلیس و همکاران [۲۱] تأثیر دما بر عملکرد حرارتی پانل‌های عایق خلا بر پایه فوم سیلیکا برای ساختمان‌ها را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. در این پژوهش تجزیه و تحلیل‌های تجربی با هدف توصیف رابطه بین مرکز هدایت حرارتی پانل و درجه حرارت متوسط انجام شده است. این آزمایش‌ها بر روی دو نمونه پانل عایق خلا با ضخامت متفاوت انجام شد. تجزیه و تحلیل‌های تجربی نشان داد زمانی که درجه حرارت متوسط از ۲ تا ۵۰ درجه سانتیگراد باشد هدایت حرارتی می‌تواند تا ۴۵ درصد افزایش یابد. بوک و همکاران [۲۲] خواص مکانیکی و مقاومت در برابر شکست کامپوزیت‌های اپوکسی/ فوم سیلیکا حاوی پلی‌سیلوکسان‌های منتهی به گلیسیدیل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حداکثر مقاومت، مدول یانگ، مقاومت در برابر شکست و انرژی شکستگی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش مقدار فوم سیلیکا افزایش یافته است؛ همچنین آن‌ها مکانیسم‌های چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌ها را با استفاده از تصاویر SEM بررسی کردند. ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک، رشد ترک‌ها و گسیختگی فوم سیلیکا که باعث افزایش مقاومت در برابر شکست و انرژی شکست نانوکامپوزیت‌ها شد. این مطالعه نشان داد که استفاده از پلی‌سیلوکسان‌های منتهی به گلیسیدیل یک روش موثر برای تولید نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با عملکرد بالا است که در آن فوم سیلیکا پراکنده شده است. سارات و همکاران [۲۳] به بررسی اثر فوم سیلیکا بر خواص مکانیکی، حرارتی و تریبولوژیکی نانوکامپوزیت‌های لاستیک سیلیکونی پرداختند. تأثیر فوم سیلیکا و سیلیس پوسته برنج در کامپوزیت‌های بایو اپوکسی توسط گارسیا و همکاران [۲۴] انجام شد. کیم و همکاران [۲۵] خواص حرارتی-مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی با استفاده از عملیات سطح بر روی فوم سیلیکا افزایش دادند. تأثیر نانوپرکننده فوم سیلیکا و توالی انباشتگی بر رفتار شکست بین لایه‌ای نانوکامپوزیت هیبریدی جوت-کولار دو جهته توسط ماهارانا و همکاران [۲۶] بررسی شد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی بر روی خواص الکتریکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری انجام شده است. سرخوش و همکاران [۲۷] به بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت زمینه پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این کامپوزیت قابلیت ویژه‌ای در خواص دی‌الکتریک از جمله ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات دارند. در تحقیقی دیگر سرخوش

همکاران [۲۸] به طراحی و ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت اپوکسی / کف پرداختند. طالعی فرد و همکاران [۲۹] به بررسی استحکام کششی و ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. رحیمی و همکاران [۳۰] به طراحی و ساخت پوشش کامپوزیتی پایه پلیمری با هدف کاربردهای الکترونیکی پرداختند. سرخوش و همکاران [۳۱] به فرایند اصلاح سطح، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی یک کامپوزیت نیمه زیست‌تخریب‌پذیر تهیه شده از پلیمر پلی‌پروپیلن و پارچه الیاف کف پرداختند. تاثیر انواع ذرات سیلیکا بر خواص دی‌الکتریک و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی توسط پاتل و همکاران [۳۲] بررسی شد. خاتک و همکاران [۳۳] اثرات فشرده‌سازی و افزودن سیلیکا بر خواص دی‌الکتریک کامپوزیت‌های اپوکسی را مورد ارزیابی قرار دادند. شیائوژن و همکاران [۳۴] نانوکامپوزیت‌های جدیدی برای کاربردهای دی‌الکتریک مبتنی بر پلی‌پروپیلن/پلی (اتیلن-کو-اکتن) پر شده با فوم سیلیکا اصلاح شده توسعه دادند. در پژوهشی دیگر شیائوژن و همکاران [۳۵] مطالعه ای تحت عنوان تأثیر اصلاح سطح فوم سیلیکا بر خواص دی‌الکتریک پلی‌پروپیلن / فوم سیلیکا انجام دادند. عزیز و همکاران [۳۶] عملکرد حرارتی و الکتریکی کامپوزیت‌های لاستیکی EPDM و EPDM/سیلیکون با استفاده از افزودنی‌های فوم سیلیکا اصلاح شده، دی‌اکسید تیتانیوم و گرافن بهبود بخشیدند. بررسی تجربی تلفات دی‌الکتریک و توزیع میدان الکتریکی در داخل عایق نانوکامپوزیت متشکل از فوم سیلیکا مورد استفاده در کابل‌های برق توسط ثابت و سالم [۳۷] انجام شد.

پرکننده فوم سیلیکا یکی از مواد استفاده شده در صنعت هوانوردی برای تولید اجزای سبک و مقاوم است. این ماده به عنوان یک پرکننده سبک و با خواص عایق حرارتی و صوتی مناسب برای استفاده در هواپیماها، فضاپیماها و دیگر وسایل هوانوردی استفاده می‌شود. این فوم سبک دارای خواص عایق حرارتی بالا، مقاومت در برابر ضربات، سختی و مقاومت به فشار است که از آن برای ساخت اجزای مختلف هوانوردی استفاده می‌شود. استفاده از پرکننده فوم سیلیکا در هوانوردی می‌تواند وزن قطعات را کاهش دهد، عملکرد و کارایی هواپیما یا فضاپیما را بهبود بخشد و همچنین از نظر اقتصادی نیز مزایای قابل توجهی دارد. به طور کلی، پرکننده فوم سیلیکا یک ماده با خصوصیات مناسب برای استفاده در صنعت هوانوردی است. همچنین از لحاظ کاربردی، در حال حاضر در کشور در ساخت وسایل پرنده برای اتصال قطعات مختلف به یکدیگر از این ماده به عنوان پرکننده برای ایجاد چسب استفاده می‌گردد. علاوه بر این نانوپرکننده فوم سیلیکا بر خلاف سایر نانو موادها به دلیل سهولت در به کار بردن در کارهای صنعتی مورد توجه است. با توجه به مرور مقالات و به دانش نویسندگان تاکنون تحقیقی در ارتباط تاثیر نانوذرات فوم سیلیکا بر خواص الکتریکی نانو کامپوزیت پلیمری اپوکسی / فوم سیلیکا در باند X انجام نشده است. لذا در این مقاله به بررسی اثر این پرکننده بر خواص مکانیکی و الکتریکی رزین پرداخته شده است و سعی بر آن شده است که ساخت نمونه‌ها، به همان شکلی که در صنعت استفاده شده است رعایت شود تا خواص مکانیکی و الکتریکی آن مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقاله ابتدا کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با درصد مختلف نانوذرات پرکننده فوم سیلیکا با استفاده از دستگاه پرس گرم ساخته شد. سپس جهت تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده، دو آزمون کشش و خمش سه نقطه انجام گرفت. مدول الاستیک، تنش تسلیم، تنش نهایی، میزان حداکثر تغییر طول، و میزان چقرمگی از آزمون کشش اندازه‌گیری شدند و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند استحکام خمشی و مدول الاستیک خمشی کامپوزیت از آزمون خمش به دست آمد و در نهایت به منظور تعیین و بررسی خواص الکتریکی کامپوزیت، آزمون ثابت دی‌الکتریک با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه در باند X انجام شد.

۲- مطالعه تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

رزین مورد استفاده در این مقاله، رزین اپوکسی EPL-1012 و هاردنر EPH-113 است که از شرکت سازه مرکب تهیه شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی رزین مطابق با داده‌های فنی شرکت سازه مرکب در جدول ۱ آورده شده است. فوم سیلیکا مورد استفاده در این پژوهش با نام ایروزیل-۲۰۰ است که خواص فیزیکی و مکانیکی آن مطابق با داده‌های فنی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات رزین اپوکسی مورد استفاده در پژوهش

خواص فیزیکی- رزین اپوکسی			
ویژگی	دمای کاری (°C)	حجم کم	حجم زیاد
عمر مصرف (Pot life)	۲۵	۶cm ³	۵۰ cm ³
زمان ژل شدن (Gel time)	۲۵	۶۰ دقیقه	۲۰ دقیقه
زمان خشک شدن (Curing time)	۲۵	۹۰ دقیقه	۲۴ دقیقه
زمان خشک شدن تا رسیدن به بالاترین استحکام	۲۵	۷ روز	۷ روز
خواص مکانیکی- رزین اپوکسی			
ویژگی	مقدار	واحد	استاندارد ASTM
مقاومت کششی	۷۶۱	Kgf/cm ²	D695M
مدول کششی	۲۷۸۹۰	Kgf/cm ²	D695M

جدول ۲ مشخصات فوم سیلیکا مورد استفاده در پژوهش (مرجع: شرکت سازنده مرکب)

ویژگی	مقدار یا نام
نام	فوم سیلیکا-۲۰۰
ماهیت ظاهری	گرد
دانسیته توده (g/l)	حدود ۵۰
مقدار سیلیسیوم دی اکسید (%)	≤ ۹۹
مساحت سطح ویژه (m ² /g)	۵۰ ± ۲۰۰

۲-۲- فرایند آماده سازی و تولید کامپوزیت

در این مقاله برای ساخت نمونه‌ها از زمینه ثابت رزین اپوکسی EPL-1012 و هاردنر EPH-113 که از شرکت سازنده مرکب تهیه شده استفاده شده است. در ساخت تمام نمونه‌ها، هاردنر مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده به نسبت ۱۵ به ۱۰۰ به رزین اپوکسی اضافه شده است. در شکل ۱-الف و شکل ۱-ب مواد استفاده شده در پژوهش نشان داده شده است.



(ب)



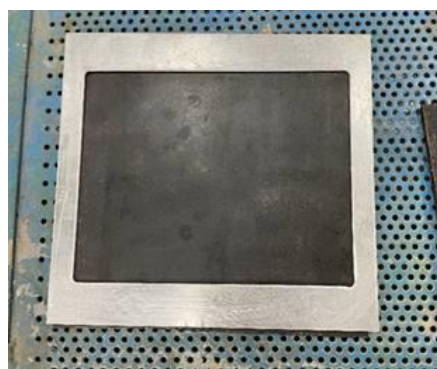
(الف)

شکل ۱ الف) رزین اپوکسی ب) فوم سیلیکا (ایروزیل-۲۰۰)

جهت به دست آوردن خواص مکانیکی با استفاده از آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه و همچنین به دست آوردن خواص الکتریکی با استفاده از آزمون ثابت دی‌الکتریک نمونه‌هایی ساخته شد. برای ساخت این نمونه‌ها، قالب‌هایی مطابق با شکل ۲-الف ساخته شده است. برای ساخت قالب‌ها از صفحات فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. این صفحات با دستگاه فرز در ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر برش زده شد تا ابعاد نمونه‌ها مطابق با استاندارد برای آزمون‌های کشش، خمش سه نقطه و دی‌الکتریک فراهم شود. برای پایین و بالای قالب‌ها از صفحاتی با جنس فولاد با ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر ساخته شد که در شکل ۲-ب نشان داده شده است. ترکیب مواد استفاده شده در پژوهش مطابق با جدول ۳ است. نانو پرکننده فوم سیلیکا پس از وزن کشی با ترازو با دقت صدم گرم به ترکیب رزین و هاردنر مطابق جدول ۳، با همزن مکانیکی ساده (۵۰۰ دور در دقیقه) مخلوط شدند. به دلیل توزیع یکنواخت، نانوذرات طی سه مرحله به مخلوط رزین اپوکسی و هاردنر اضافه شد. نانوذرات فوم سیلیکا تا حدی به زمینه رزین اضافه شد که ماده نهایی از نظر ویسکوزیته در حالت خمیری شکل قرار گیرد، این حالتی است که می‌توان به عنوان چسب و اتصال دهنده یا پرکننده در سازه، استفاده نمود. فوم سیلیکا با دو نوع ویسکوزیته و درصد وزنی متفاوت به ترکیب رزین و هاردنر، افزوده شد تا خواص مکانیکی و الکتریکی آن‌ها با هم مقایسه و بررسی گردد. نمونه خمیری شکل فوم سیلیکا با دو ویسکوزیته مختلف در شکل ۳-الف و شکل ۳-ب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲ الف) قالب ساخته شده جهت ساخت نمونه‌ها ب) صفحات فولادی بالایی و پایینی قالب‌ها

جدول ۳ مشخصات و وزن نمونه‌های ساخته شده در مقاله

شماره نمونه	مواد	رزین اپوکسی (gr)	هاردنر (gr)	فوم سیلیکا (gr)
۱	رزین اپوکسی خالص	۱۵۰	۲۲/۵	-
۲	رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا با ۵ درصد وزنی	۱۵۰	۲۲/۵	۸/۵
۳	رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا با ۹ درصد وزنی	۱۵۰	۲۲/۵	۱۷



(ب)



(الف)

شکل ۳ الف) رزین اپوکسی پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ ب) رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با درصد وزنی ۹

در ادامه پس از تمیزکاری قالب با تینر و آغشته کردن قالب‌ها به واکس به جهت جلوگیری از چسبیدن قالب به قطعه، مواد مطابق با شکل ۴-الف در داخل قالب ریخته شد. پس از ریختن مواد داخل قالب، آن‌ها را درون فک‌های دستگاه پرس با فشار ۱۵۰ psi و دمای اتاق ۲۵ درجه، جهت پخت به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد همان‌طور که در شکل ۴-ب نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فرایند آماده‌سازی، ساخت و پخت تا رسیدن به مطلوب‌ترین نمونه، حداقل سه مرحله تکرار شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت قالب‌ها از فشار فک‌های دستگاه پرس گرم خارج شدند و سپس قطعات با دقت از قالب خارج شدند، همان‌طور که در شکل ۵-الف و شکل ۵-ب نشان داده شده است. جهت عملیات پخت نهایی^۱ نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای محیط قرار گرفتند.



(ب)



(الف)

شکل ۴ الف) نمونه قالب‌گیری شده فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ درصد ب) قالب نمونه در دستگاه پرس



(ب)



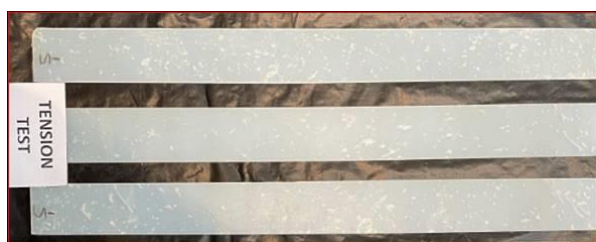
(الف)

شکل ۵ الف) قطعه پخت شده با پرکننده فوم سیلیکا با درصد وزنی ۹ ب) قطعه پخت شده با پرکننده فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵

۲-۳- آزمون کشش

پس از ساخت قطعات، نمونه‌های تست کشش با ابعادی مطابق با استاندارد ASTM-D3039 [۳۸] با استفاده از اره مویی از صفحات برش داده شده است. در شکل ۶-الف و شکل ۶-ب ابعاد نمونه‌ها برش داده شده از قطعات رزین پر شده با فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی و ۹ درصد وزنی مطابق با استاندارد نشان داده شده است. ابعاد و اندازه نمونه‌ها مطابق استاندارد برابر با ضخامت ۲ میلی‌متر، طول ۲۰۰ میلی‌متر و عرض ۲۵ میلی‌متر است. برای انجام آزمون کشش در این مقاله از دستگاه تست کشش و خستگی محوری (INSTRON R5500) استفاده شده است. مطابق کاتالوگ ظرفیت دستگاه ۲۰۰ کیلو نیوتون (کشش و فشار) و دامنه سرعت آزمایش ۰/۰۰۱ الی ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

¹ Post Curing



(ب)



(الف)

شکل ۶ الف) نمونه‌های برش داده شده رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی ب) نمونه‌های برش داده شده رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی

این آزمون در دمای محیطی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۳۵ درصد و سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است که با توجه به استاندارد این سرعت برای بارگذاری شبه‌استاتیکی مطلوب است. طول نمونه بین دو فک دستگاه آزمون کشش ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، بنابراین ۴۰ میلی‌متر از بخش بالای نمونه در داخل فک بالا و ۴۰ میلی‌متر از بخش پایین نمونه در داخل فک پایین قرار گرفت. به منظور جلوگیری از لغزش یا شکست لبه‌ی نمونه‌ها در داخل فک دستگاه آزمون کشش، برای دو لبه‌ی هر نمونه تب^۱ آماده‌سازی و نصب شد. ابعاد این تب‌ها ۴۰ میلی‌متر در ۲۵ میلی‌متر است. تب از جنس نمونه مورد آزمون بوده و پس از برش ابعاد، با ایجاد خراش‌های خطی و سطحی کم عمق با زاویه $\pm 45^\circ$ ، در سطح مشترک آن با نمونه‌ی آزمایش توسط چسب سیانواکریلات آغشته و تحت فشار ثابت متصل قرار داده شد و به آن زمان داده شد تا به استحکام برسد همان‌طور که در شکل ۷-الف نشان داده شده است. پس از انجام آزمون، نمونه‌ها در استحکام کششی نهایی خود داخل دستگاه آزمون کشش دچار شکست شدند همان‌طور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است. نتایج نمودار نیرو-جابجایی در هر لحظه توسط کامپیوتر متصل به دستگاه ضبط شد و سپس نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی به دست آمد.



(ب)



(الف)

شکل ۷ الف) نحوه قرارگیری تب روی نمونه داخل فک در دستگاه آزمون کشش ب) نمونه دچار شکست در دستگاه آزمون کشش

۲-۴- آزمون خمش

جهت انجام آزمون خمش سه نقطه، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D7246M-03 [۳۹] برش داده شد. ابعاد و اندازه نمونه‌ها مطابق استاندارد برابر با ضخامت ۲ میلی‌متر، طول ۷۶/۸ میلی‌متر و عرض ۱۳ میلی‌متر است. براساس این استاندارد ضخامت قطعات ۴ میلی‌متر و فاصله دو تکیه‌گاه دستگاه خمش سه نقطه، ۳۲ برابر این ضخامت بوده که برابر با ۱۲۸ میلی‌متر است و طول نمونه باید ۲۰

¹ TAB

درصد بیشتر از فاصله میان دو تکیه گاه باشد. طول نمونه‌ها در حالت استاندارد ۱۵۳٫۶ میلی‌متر، و عرض نمونه نیز ثابت و برابر با ۱۳ میلی‌متر است. در صورت عدم امکان دسترسی به این ضخامت می‌توان با تغییر طول قطعه و حفظ نسبت فاصله دو تکیه گاه که ۳۲ برابر ضخامت است نمونه‌ای با ضخامت‌های متفاوت و در نتیجه طول متفاوت آماده نمود اما مقدار عرض ثابت است. تمامی نمونه‌ها از قطعاتی که فرایند ساخت آن تشریح شد برش داده شد همان طور که در شکل ۸-الف تا شکل ۸-ج نشان داده شده است. ضخامت نمونه‌ها ۲ میلی‌متر است. با در نظر گرفتن شرایط استاندارد ذکرشده، طول هر نمونه برابر با ۷۶/۸ میلی‌متر است و فاصله دو تکیه گاه ۶۴ میلی‌متر است.



(ج)



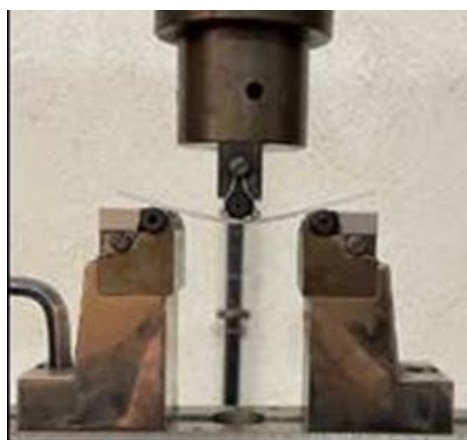
(ب)



(الف)

شکل ۸ نمونه‌های برش داده شده برای آزمون خمش (الف) رزین خالص (ب) رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی (ج) رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی

برای انجام آزمون تست خمش سه نقطه، از دستگاه اینسترون (INSTRON R5500) استفاده شده است. سرعت انجام آزمون مورد نظر ۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. دستگاه آزمون خمش سه نقطه به همراه نمونه آزمون در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ نمونه در حین آزمون خمش سه نقطه

در یک تیر همگن با تکیه گاه‌های لولایی و بارگذاری متمرکز در مرکز آن، بیشینه تنش در پوسته بیرونی تیر و در وسط تیر به وجود می‌آید. تنش در هر نقطه از نمودار نیرو-جابجایی می‌تواند با استفاده از معادله ۱ بیان شود. روابط زیر از مرجع استاندارد ASTM D7246M-03 [۳۹] استخراج شده است.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق میزان تنش در پوسته خارجی تیر و در میانه تیر است و به ترتیب P مقدار نیرو در هر نقطه از نمودار نیرو-جابجایی، L فاصله میان دو تکیه گاه، b عرض تیر و h ضخامت تیر هستند. همچنین بیشینه کرنش نیز در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر که محل اعمال نیرو است به‌وجود می‌آید که مقدار آن با معادله ۲ بیان شده است.

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (2)$$

در معادله ۲، ϵ بیشینه کرنش در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر است و δ میزان خیز وسط تیر است. با توجه به روابط فوق می‌توان با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی که از آزمون خمش سه نقطه بدست می‌آید، نمودار تنش-کرنش بیشینه را در پوسته بیرونی و در وسط تیر به‌دست آورد. مدول الاستیک عبارت است از نسبت یک بازه از تنش به بازه کرنش متناظر آن برای محاسبه مدول الاستیک و تری خمشی^۱، بازه پیشنهاد شده در استاندارد ۰/۰۰۲ می‌باشد که از کرنش ۰/۰۰۱ بر روی نمودار شروع شده و تا کرنش ۰/۰۰۳ ادامه می‌یابد. بنابراین مدول الاستیک و تری خمشی در این بازه با استفاده از معادله ۳ محاسبه شده است.

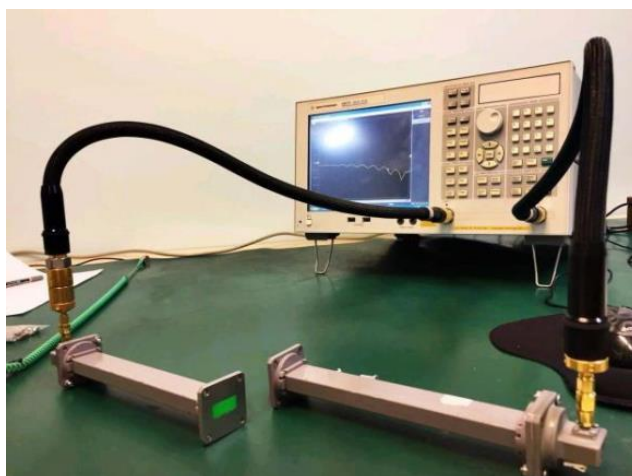
$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3)$$

در رابطه فوق E_f^{chord} مدول الاستیک و تری خمشی می‌باشد و $\Delta\sigma$ و $\Delta\epsilon$ نیز به ترتیب تفاضل تنش و کرنش در دو نقطه انتخابی است که به طور معمول $\Delta\epsilon = 0.002$ است. مدول الاستیک سکانت خمشی^۲ عبارت است از نسبت تنش به کرنش در هر نقطه دلخواه از نمودار تنش-کرنش و با واحد MPa بیان می‌شود. نقطه شروع برای محاسبه مدول الاستیک سکانت خمشی، نقطه مبدا در نمودار تنش-کرنش است. با استفاده از معادله ۴ می‌توان این مقدار را محاسبه نمود.

$$E_f^{secant} = \frac{L^3 m}{4bh^2} \quad (4)$$

۲-۵- آزمون ثابت دی‌الکتریک

آزمون ثابت دی‌الکتریک برای تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی کامپوزیت تولید شده انجام شد. آزمون ثابت دی‌الکتریک با استفاده از دستگاه نتورک آنالیزر^۳ واقع در پژوهشگاه نصر، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، انجام شد.



شکل ۱۰ دستگاه نتورک آنالیزر

¹ Flexural Chord Modulus of Elasticity

² Flexural Scant Modulus Elasticity

³ Network Analyzer

استاندارد اندازه‌گیری مشخصه‌های دی‌الکتریک مواد براساس استاندارد ASTM D5568 [۴۰] روش اندازه‌گیری موجبری دو پورت است. تکنیک موجبری مستطیلی نمونه‌ای از دسته‌بندی تکنیک‌های اندازه‌گیری است که تکنیک خط انتقال جهت دستیابی به ضریب گذردهی و نفوذپذیری مختلط نمونه نامیده می‌شود. در این تکنیک نمونه با سطح مقطع موجبری تطبیق و به همان اندازه پر می‌شود و میزان بازگشتی در طول نمونه اندازه‌گیری می‌شود. تکنیک‌های اندازه‌گیری خط انتقال به طور معمول دقیق‌تر از تکنیک تک پورتهی است. این تکنیک برای اندازه‌گیری گذردهی الکتریکی نسبی مختلط (ثابت دی‌الکتریک نسبی و تلف) و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مختلط یک ماده جامد، ایزوتروپیک، مناسب است. این اندازه‌گیری برای محدوده فرکانسی ۱۰۰ مگا هرتز تا ۲۰ گیگا هرتز معتبر است. این محدوده دقیق نیست و بستگی به اندازه نمونه و اندازه خط انتقال موجبر مستطیلی نگهدارنده دارد (نمونه‌های بزرگ در فرکانس‌های پایین و نمونه‌های کوچک برای فرکانس‌های بزرگ). به عنوان یک روش غیر رزونانسی انتخاب هر تعداد فرکانس اندازه‌گیری گسسته در محدوده فرکانسی مناسب خواهد بود. برای پوشش کل محدوده فرکانسی استفاده از چند موجبر با ابعاد مختلف مورد نیاز است. هم چنین به طور کلی این آزمایش را می‌توان برای موجبرهای دایروی نیز به کار برد. نمونه‌های مورد آزمایش بایستی به اندازه کافی بلند باشند. برش نمونه‌ها بایستی دقیق و بدون بریدگی‌های نامرتب باشد؛ چرا که وجود هرگونه کوتاه یا بلندی نامنظم در اندازه نمونه‌ها باعث ورود هوای اضافی (ماده‌ای با دی‌الکتریک متفاوت) در لبه‌های مشترک نمونه با موجبر شده و نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نمونه‌ها بایستی بسیار تمیز و بدون آلودگی باشند. برای انجام این آزمون برای هر کدام از ۳ ماده ذکر شده، دو نمونه با ابعاد ۱۰/۱۶ میلی‌متر، طول ۲۲/۸۶ میلی‌متر و با ضخامت تقریبی ۲ میلی‌متر همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده به صورت دستی برش زده شد. این ابعاد برابر با ابعاد تیغی دستگاه آزمون در نظر گرفته شدند. نمونه‌ها بایستی تا حد امکان صاف و بدون خمیدگی باشند.



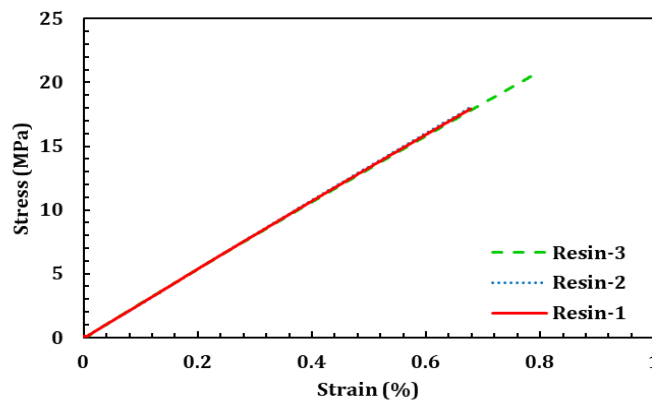
شکل ۱۱ نمونه‌های برش داده شده برای تست دی‌الکتریک

۳- نتایج

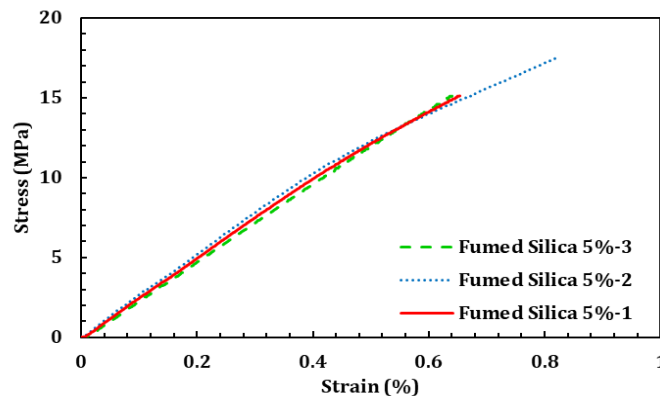
با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی نمونه‌های پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با رزین اپوکسی خالص مقایسه شد. اولین نکته قابل توجه در نمودارهای تنش- کرنش استحکام تنشی است. همچنین شیب این نمودار در ناحیه الاستیک، بیانگر مدول الاستیک است. هرچقدر شیب این نمودار بیشتر باشد، مدول الاستیک آن بزرگ‌تر خواهد شد. همچنین لازم به ذکر است که مساحت زیر نمودار تنش-کرنش در تست کشش، بیانگر مقیاس چقرمگی نمونه است. در این آزمایش از هر ماده، چهار نمونه مشابه، تهیه و تحت آزمون کشش قرار گرفت. با توجه به نزدیکی نمودارها در سه نمونه تحت آزمون و خرابی برخی از نمونه‌ها حین آزمون، نمودارها به‌طور میانگین با سه نمونه نهایی استخراج شد تا مورد بررسی قرار گیرد. مطابق شکل ۱۲ برای ماده رزین اپوکسی میانگین استحکام کششی ۱۸ مگاپاسکال و حداکثر کرنش قابل تحمل آن ۰/۶۷ درصد است. طبق شکل ۱۳ برای ماده رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی، میانگین استحکام کششی ۱۶ مگاپاسکال در حداکثر کرنش ۰/۶۵ درصد است. برای ماده رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا با ۹ درصد وزنی میانگین استحکام کششی ۱۰ مگاپاسکال در حداکثر کرنش ۰/۳ درصد است. آن‌چنان که در شکل ۱۴ نشان داده شده

است. همان طور که در نمودار تنش- کرنش شکل ۱۲ نشان داده شده است نمودار به صورت خطی است و دارای ناحیه الاستیک خطی است و بلافاصله بعد از نقطه تسلیم دچار شکست می‌گردد. رفتار نمودار تنش-کرنش رزین اپوکسی نشان‌دهنده این است که رزین به عنوان یک ماده ترد عمل می‌کند. با افزودن نانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت در کرنش کم‌تری دچار شکست می‌گردد و با افزایش مقدار نانوذرات فوم سیلیکا از ۵ درصد به ۹ درصد، کرنش شکست نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد و نانوکامپوزیت نسبت به رزین خالص تردتر می‌گردد، همان طور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است؛ علت این موضوع می‌تواند به بزرگی نانوذرات فوم سیلیکا و کاهش چسبندگی و پیوند لازم بین نانوذرات فوم سیلیکا و اپوکسی و در نتیجه ترد شدن ماده مرتبط دانست. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا در مقایسه با رزین خالص در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در نمونه فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، کاهش کرنش و افزایش مدول یانگ بیان‌گر این موضوع است که با بالابردن میزان نانوذرات فوم سیلیکا به زمینه رزین اپوکسی، نانو ماده مرکب به سمت تردی بیش‌تر پیش می‌رود و دلیل این امر را می‌توان به تجمع توده‌های نانوذره با افزایش مقدار نانو نسبت داد که خود زمینه‌ساز رشد ترک و ایجاد تمرکز تنش در نانوکامپوزیت و شکست ماده در مقدار تنش‌های کمتر می‌شود همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

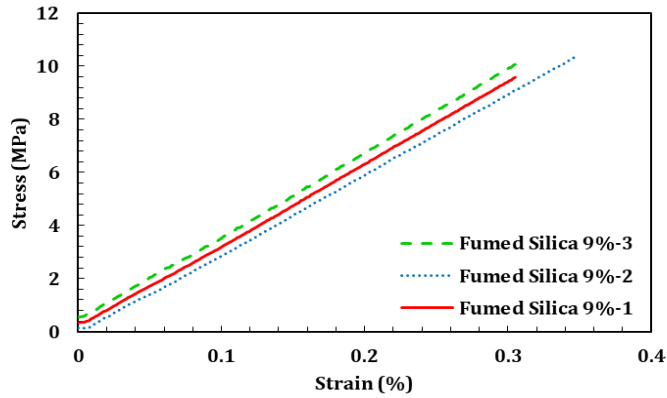
شکل ۱۶ نمودار تنش-کرنش رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا در مقایسه با رزین خالص را نشان می‌دهد، استحکام کششی نمونه فوم سیلیکا در مقایسه با نمونه رزین کاهش یافته است. بر اساس نمودارهای تنش-کرنش، بیشترین تحمل تنش یا استحکام کششی برای رزین خالص است که در کرنش ۰/۷۵ درصد باعث شکست نمونه آزمون شده است و کمترین استحکام کششی مربوط به رزین پر شده با فوم سیلیکا با درصد وزنی ۹ درصد با ۱۰ مگاپاسکال است. علت این مشاهدات، محدود شدن درجه اتصالات عرضی تشکیل شده در حین فرایند پخت بستر به دلیل افزایش برهم‌کنش پلیمر-پرکننده است. در پژوهش پراگنلا و همکاران [۱۸]، کاهش خواص مکانیکی مانند مدول کششی گزارش شده است که نتایج در این مقاله در رابطه با ماده فوم سیلیکا تایید می‌کند. همچنین با افزودن نانو ماده فوم سیلیکا به رزین مشاهده شد مقدار مدول الاستیک ابتدا کمی کاهش و سپس با افزایش جرم فوم سیلیکا به ۹ درصد وزنی افزایش یافت. نتایج حاصل شده در این مقاله با نتایج پژوهش دوراما و همکاران [۱۵] تطابق دارد. در جدول ۴ نتایج آزمون کشش به صورت خلاصه آورده شده است.



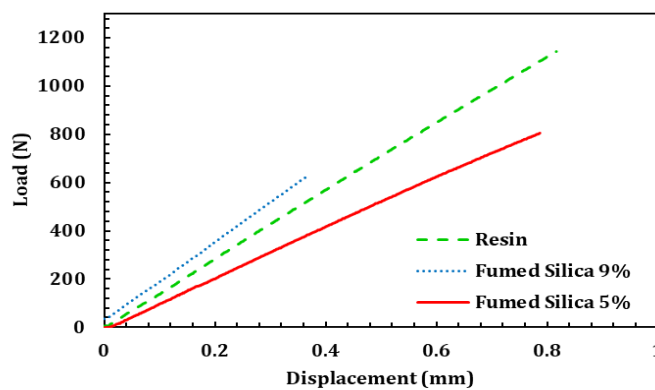
شکل ۱۲ نمودار تنش کرنش برای نمونه‌های رزین اپوکسی خالص



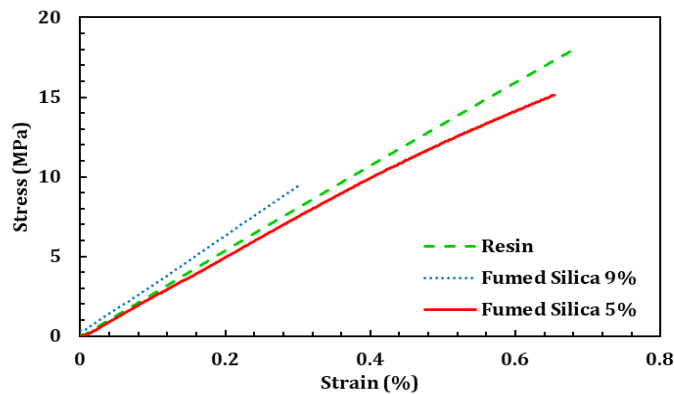
شکل ۱۳ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی



شکل ۱۴ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی



شکل ۱۵ مقایسه نمودار نیرو جابجایی آزمون کشش رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا با رزین خالص



شکل ۱۶ نمودار تنش-کرنش کششی رزین خالص و رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا

جدول ۴ نتایج حاصل از آزمون کشش

نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول (GPa)	چقرمگی ($\frac{KJ}{m^3}$)	کرنش (%)
رزین	۱۸	۲/۷	۶/۰۸	۰/۶۷۸
فوم سیلیکا ۵٪	۱۶	۲/۵	۴/۹	۰/۶۵
فوم سیلیکا ۹٪	۱۰	۳/۱	۱/۵	۰/۳۱

سطح زیر نمودار تنش-کرنش در آزمون کشش، مقدار چقرمگی ماده را نشان می‌دهد، هرچه این سطح بیش‌تر باشد، ماده دیرتر دچار شکست می‌گردد. با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده شد که چقرمگی با افزودن فوم سیلیکا به رزین زمینه مقدار چقرمگی کاهش

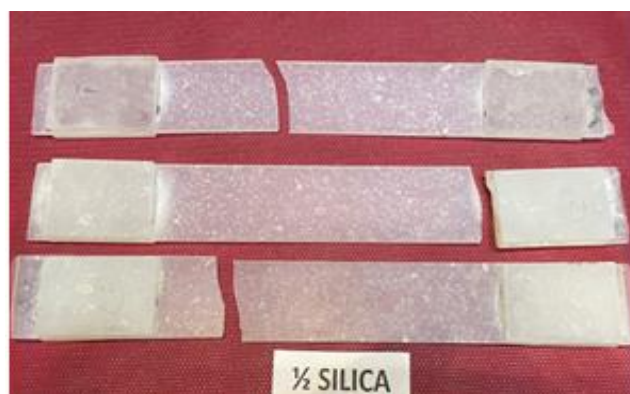
چشم‌گیری داشته است. دلیل کاهش استحکام کششی در نمونه‌های رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا را می‌توان بزرگی نانوذرات فوم سیلیکا و کاهش چسبندگی و پیوند لازم بین نانوذرات فوم سیلیکا و اپوکسی و در نتیجه ترد شدن ماده دانست. برای تایید این موضوع در پژوهش دیتانت و همکاران [۹] اثر افزودن نانوذرات فوم سیلیکا با اندازه ذرات مختلف به رزین اپوکسی را بررسی کرده که تاثیر مقدار و اندازه ذرات سیلیکا را روی پارامترهایی چون مدول یانگ، تنش تسلیم، چقرمگی و انرژی شکست مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا تاثیر به‌سزایی روی تنش تسلیم رزین اپوکسی ندارد. البته باید به این نکته اشاره کرد در مورد رفتار تنش تسلیم اپوکسی با وجود ذرات سیلیکا، تفاوت‌هایی در نتایج تحقیق پژوهشگران وجود دارد. تحقیقات زاپالرتو و همکاران [۱۰] خلاف این موضوع را نشان می‌دهد. همچنین کاواکوچی و همکاران [۱۱] در مقایسه‌ی یک سیستم اپوکسی مشابه با کار [۹]، در افزودن ذرات سیلیکا با قطر ۴۲ میکرو، افزایش تنش تسلیم را مشاهده کردند. برای توضیح این مشاهدات، چسبندگی بین ذرات و اپوکسی باید در نظر گرفته شود. برای سیستم‌هایی با برهمکنش ضعیف بین زمینه و ذرات، ذرات قادر به تحمل بار خارجی نخواهند بود و استحکام کامپوزیت از استحکام پلیمر خالص کمتر خواهد بود. ناحیه و زاویه شکست نمونه‌ها پس از اتمام آزمون کشش در شکل ۱۷ و ۱۸ (الف) و (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود زوایای شکست حدود ۹۰ درجه می‌باشد که موید تردی نمونه‌ها که از خواص اپوکسی است می‌باشد.



شکل ۱۷ شکست نمونه‌های رزین خالص در آزمون کشش



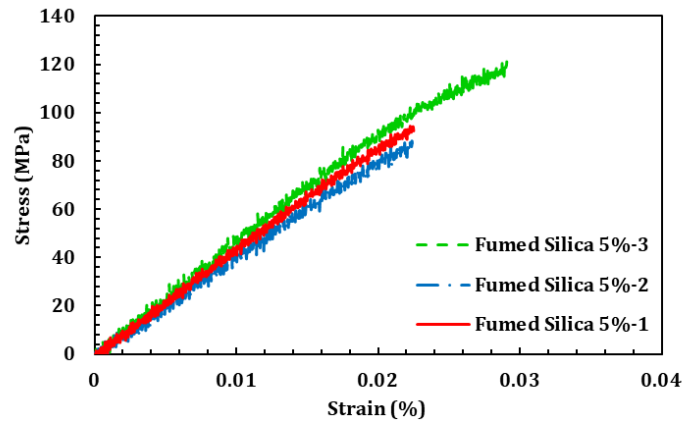
(ب)



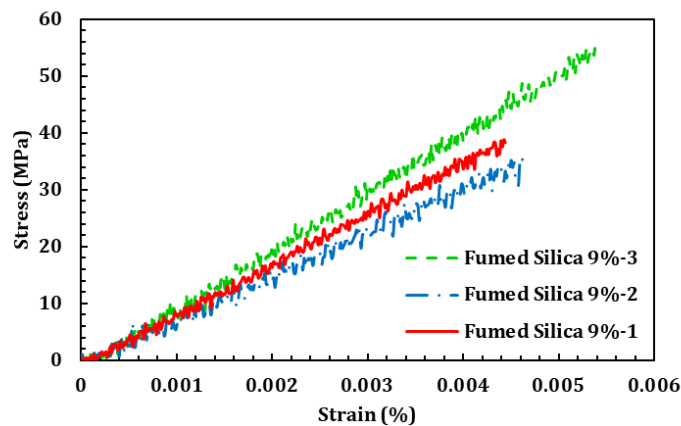
(الف)

شکل ۱۸ شکست نمونه‌ها در آزمون کشش (الف) رزین پر شده با ۵ درصد وزنی نانوذرات فوم سیلیکا (ب) رزین پر شده با ۹ درصد وزنی نانوذرات فوم سیلیکا

برای انجام آزمون خمش سه نقطه، سه نمونه از هر ماده تحت آزمون خمش قرار گرفت و نتایج خواص خمشی آن استخراج شد. با توجه به نمودارهای تنش-کرنش در این آزمون بیش‌ترین استحکام خمشی مربوط به رزین اپوکسی با ۱۰۹ مگاپاسکال است. نمودارهای تنش-کرنش رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با ۵ و ۹ درصد به ترتیب در شکل ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است که میانگین استحکام خمشی برای رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با ۵ و ۹ درصد به ترتیب برابر با ۱۰۲ و ۴۳ مگاپاسکال است.



شکل ۱۹ نمودار تنش-کرنش آزمون خمش برای نمونه‌های رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی

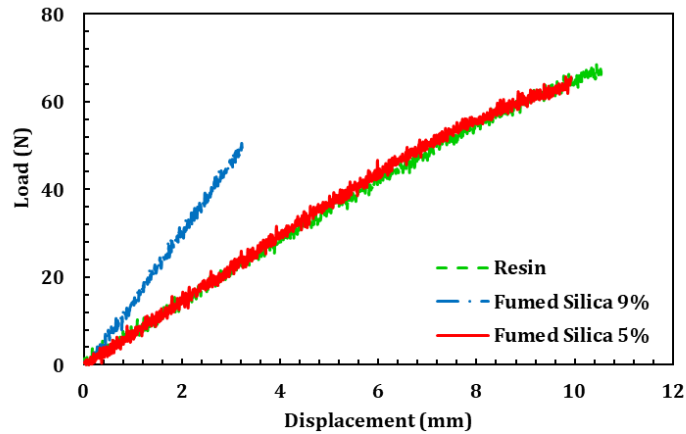


شکل ۲۰ نمودار تنش-کرنش آزمون خمش برای نمونه‌های رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی

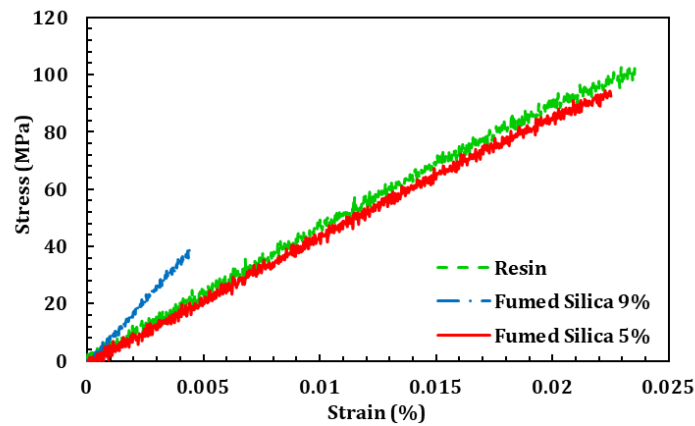
در شکل ۲۱ نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا در مقایسه با رزین خالص نشان داده شده است. نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از نتایج آزمون خمش در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مشاهده شد که استحکام خمشی رزین اپوکسی نسبت به شرایطی که رزین با پرکننده‌های نانوذرات فوم سیلیکا پر شده، بیشتر است. استحکام خمشی با افزایش دو برابر وزن پرکننده به زمینه رزین کاهش چشم‌گیری داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی پرکننده به رزین به دلیل کاهش چسبندگی و در نهایت ترد شدن ماده، میزان مقاومت خمشی روند کاهشی داشته است. با توجه به نمودار تنش-کرنش در آزمون خمش، می‌توان گفت در رزین پر شده با فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، مدول الاستیک و تری افزایش داشت، اما استحکام خمشی و مقدار کرنش نسبت به رزین و فوم سیلیکا ۵ درصد، کاهش چشم‌گیری داشته است. همچنین مشاهده شد با افزودن فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی به رزین اپوکسی، تنش و کرنش تغییر قابل توجهی نسبت به رزین خالص نداشت؛ اما با افزایش فوم سیلیکا به مقدار ۹ درصد، استحکام خمشی و کرنش کاهش زیادی داشت. در جدول ۵ نتایج آزمون خمش سه نقطه، آورده شده است. نتایج آزمون خمش در جدول ۵، نشان می‌دهد که با افزودن مواد پرکننده فوم سیلیکا به زمینه رزین اپوکسی، استحکام خمشی کاهش یافته است. از دلایل کاهش استحکام، می‌توان به ایجاد تخلخل و حباب‌های موجود در ترکیب رزین با فوم سیلیکا، کاهش چسبندگی و همچنین نوع روش ساخت اشاره کرد. زاویه و شکل شکست نمونه‌ها پس از پایان آزمایش خمش سه نقطه در شکل ۲۳ نشان داده شده است.

جدول ۵ نتایج آزمون خمش

نمونه	استحکام خمشی (MPa)	حداکثر کرنش	مدول الاستیک و تری (MPa)
رزین	۱۰۹	۰/۰۲۶	۵۳۵۳
فوم سیلیکا ۵٪	۱۰۲	۰/۰۲۲۵	۴۵۵۵
فوم سیلیکا ۹٪	۴۳	۰/۰۰۴۴	۹۲۵۰



شکل ۲۱ نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش برای رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا و رزین خالص



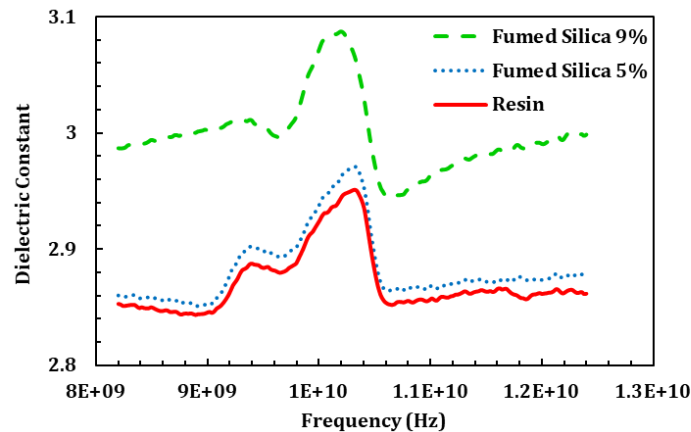
شکل ۲۲ نمودار تنش-کرنش آزمون خمش برای فوم سیلیکا و رزین



شکل ۲۳ شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون خمش سه نقطه

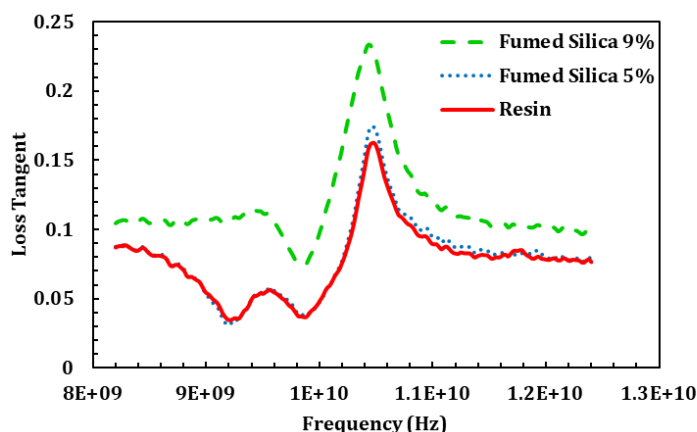
نمونه‌های ثابت دی‌الکتریک-فرکانس، تانژانت تلفات-فرکانس، ثابت مغناطیسی-فرکانس برای نمونه‌های آماده شده رزین خالص، نمونه‌های پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با استفاده از دستگاه نتورک آنالیزر در باند X مطابق شکل ۲۴ تا ۲۶ به دست آمد. باند فرکانس X، دسته‌ایی از پرتوهای میکروویو امواج الکترومغناطیسی با بازه فرکانسی ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز هستند که در ارتباطات ماهواره‌ای، راداری، فضایی، رادیویی، کنترل ترافیک هوایی و ایستگاه‌های هواشناسی کاربردهای فراوانی دارد. براساس منحنی‌های ثابت دی‌الکتریک-فرکانس نشان داده شده در شکل ۲۴، بیشینه ثابت دی‌الکتریک در باند فرکانس X، برای رزین اپوکسی، فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی و فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با، ۲/۹۵ و ۲/۹۷ و ۳/۰۹ است. بیشینه ثابت دی‌الکتریک فوم سیلیکا ۵ درصد

وزنی نسبت به بیشینه ثابت دی‌الکتریک رزین اپوکسی ۰/۶۷ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد با افزودن فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ درصد به رزین اپوکسی، ثابت دی‌الکتریک نسبت به رزین اپوکسی تغییر قابل توجهی نداشته است. بیشینه ثابت دی‌الکتریک فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی نسبت به بیشینه ثابت دی‌الکتریک رزین اپوکسی ۴/۷۴ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد با افزایش درصد وزنی نانوذرات فوم سیلیکا به ۹ درصد ثابت دی‌الکتریک افزایش پیدا کرده است. علت این موضوع می‌تواند به توزیع یکنواخت‌تر و تعداد و غلظت نانوذرات فوم سیلیکا ۹ درصد در رزین اپوکسی نسبت به نانوذرات فوم سیلیکا ۵ درصد باشد.



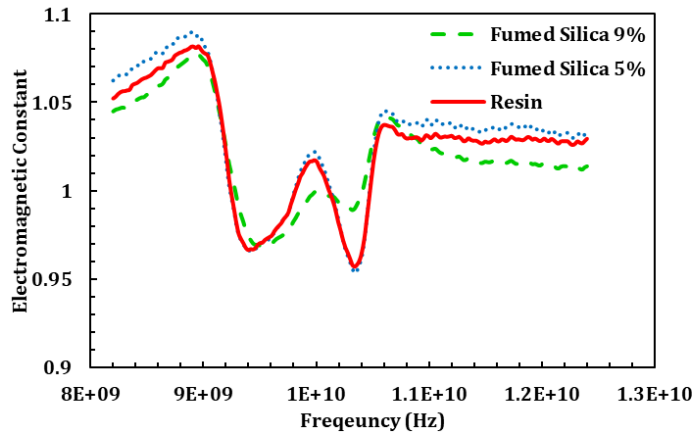
شکل ۲۴ نمودار ثابت دی‌الکتریک-فرکانس نمونه‌های رزین خالص و رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا

بر اساس منحنی‌های تانژانت تلفات-فرکانس در شکل ۲۵، بیشینه تانژانت تلفات برای رزین اپوکسی، فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی و فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر است با، ۰/۱۶، ۰/۱۷ و ۰/۲۳ است. بیشینه تانژانت تلفات فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی نسبت به بیشینه تانژانت تلفات رزین اپوکسی ۶/۲۵ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد با افزودن فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، تانژانت تلفات نسبت به رزین اپوکسی تغییر قابل توجهی نداشته است. بیشینه تانژانت تلفات فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی نسبت به بیشینه تانژانت تلفات رزین اپوکسی ۴۳/۷۵ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد با افزایش درصد وزنی نانوذرات فوم سیلیکا به ۹ درصد تانژانت تلفات افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. علت این موضوع می‌تواند به توزیع یکنواخت‌تر و تعداد و غلظت نانوذرات فوم سیلیکا ۹ درصد در رزین اپوکسی نسبت به نانوذرات فوم سیلیکا ۵ درصد باشد.



شکل ۲۵ نمودار تانژانت تلفات - فرکانس نمونه‌های رزین خالص و رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا

همچنین نمودار ثابت مغناطیسی-فرکانس به دست آمده از آزمون ثابت دی‌الکتریک برای نمونه‌های رزین خالص، رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا در شکل ۲۶ نشان داده شد. نتایج آزمون دی‌الکتریک برای نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۲۶ نمودار ثابت مغناطیسی رزین پر شده با فوم سیلیکا

جدول ۶ نتایج آزمون دی الکتریک

نمونه	ثابت دی الکتریک	تازنانت تلفات	ثابت مغناطیسی
رزین	۲/۹۵	۰/۱۶	۱/۰۸۱
فوم سیلیکا ۵٪	۲/۹۷	۰/۱۷	۱/۰۸۹
فوم سیلیکا ۹٪	۳/۰۹	۰/۲۳	۱/۰۷۷

در بعضی از مواد، ثابت دی الکتریک و ثابت مغناطیسی به طور همزمان تغییر می کنند و رابطه ای بین این دو خصوصیت وجود دارد. به عبارت دیگر، خواص الکتریکی و مغناطیسی یک ماده به یکدیگر وابسته هستند. رابطه بین ثابت دی الکتریک (ϵ_0) و ثابت مغناطیسی (μ_0) به صورت معادله ۵ است:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (5)$$

که در اینجا c سرعت نور در خلاء است.

با توجه به کاربرد وسیع نانوذرات پرکننده فوم سیلیکا در صنعت هوافضا به جهت اتصال پوسته ها به یکدیگر، بررسی اثر نانوذرات فوم سیلیکا بر خواص الکتریکی نانوکامپوزیت پلیمری اپوکسی / فوم سیلیکا از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بیشترین تاثیر را بر آشکارسازی راداری انواع وسایل پرنده، پارامترهایی مانند شکل هندسی، مواد به کار رفته، پس زمینه و پوشش های طبیعی یا مصنوعی دارد. در مواد جذب راداری از موادی استفاده می شود که خاصیت دی الکتریکی یا مغناطیسی دارند که در برخورد امواج الکترومغناطیسی، با جذب این امواج، باعث تضعیف و جذب کامل امواج می شود. مطابق جدول ۶، نتایج خواص الکتریکی و مغناطیسی نمونه های استفاده شده در این مقاله نشان می دهد که افزودن پرکننده ی نانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، تاثیر منفی بر روی خواص الکتریکی و مغناطیسی رزین اپوکسی نداشته است. همچنین این مواد از خواص بالقوه ای در طراحی کاربردهای مغناطیسی و الکتریکی نسبت به فلزات برخوردار است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی و الکتریکی افزودن نانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی که به عنوان چسب اتصال قطعات هوافضا استفاده می شود، پرداخته شده است. جهت مقایسه، قطعاتی با رزین خالص، رزین پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ و ۹ درصد آماده و با استفاده از دستگاه پرس ساخته شدند. مهم ترین نتایج به دست آمده در ذیل آمده است:

- با افزودن فوم سیلیکا به زمینه اپوکسی، استحکام کششی کاهش یافت اما مدول الاستیک در فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، افزایش پیدا کرد. در نمونه فوم سیلیکا با افزایش درصد وزنی تا ۹ درصد، استحکام کششی و کرنش نهایی رزین اپوکسی، حدود ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد. این مسئله می تواند به دلیل افزایش تخلخل و خاصیت شکنندگی بیشتر باشد.

- در نمونه فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، کاهش کرنش و افزایش مدول یانگ بیانگر این موضوع است که با بالابردن میزان نانوذرات فوم سیلیکا به زمینه رزین اپوکسی، نانو ماده مرکب به سمت تردی بیشتر پیش می‌رود و دلیل این امر را می‌توان به تجمع توده‌های نانوذره با افزایش مقدار نانو نسبت داد که خود زمینه ساز رشد ترک و ایجاد تمرکز تنش در نانوکامپوزیت و شکست ماده در مقدار تنش‌های کمتر می‌شود.
- در آزمون خمش سه نقطه، بیشترین استحکام خمشی مربوط به رزین با ۱۰۹ مگاپاسکال است. با افزودن ۵ درصد وزنی نانوذرات فوم سیلیکا به رزین، استحکام خمشی به ۱۰۲ مگاپاسکال رسید. با افزایش دو برابری وزن فوم سیلیکا در رزین، مقدار استحکام خمشی حدود ۶۰ درصد کاهش و به ۴۳ مگاپاسکال رسید. انتقال تنش بین بستر رزین اپوکسی و فوم سیلیکا کاهش یافت و وجود تخلخل بیشتر در نانوذرات فوم سیلیکا باعث کاهش استحکام خمشی شد. برای تقویت استحکام، می‌توان از روش‌های ساخت بهینه‌تر استفاده کرد.
- در آزمون‌های دی‌الکتریک مشاهده شد که با افزودن ماده پرکننده نانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، پارامترهای ثابت دی‌الکتریک، تانژانت تلفات و ثابت مغناطیسی، نسبت به رزین اپوکسی تغییرات قابل توجهی نداشت، افزودن این پرکننده به رزین، تاثیر منفی روی خواص الکتریکی و مغناطیسی رزین و در نهایت روی ویژگی‌های جذب امواج و رادارگریز بودن سازه نداشت.

فهرست علائم

P	نیرو
h	ضخامت تیر
L	فاصله میان دو تکیه‌گاه
b	عرض تیر
E_f^{chord}	مدول الاستیک وتری خمشی
c	سرعت نور در خلاء

علائم یونانی

σ	تنش در پوسته خارجی تیر
ϵ	بیشینه کرنش در پوسته خارجی تیر
δ	میزان خیز نقطه وسط تیر
$\Delta\sigma$	تفاضل تنش
$\Delta\epsilon$	تفاضل کرنش
ϵ_0	ثابت دی‌الکتریک
μ_0	ثابت مغناطیسی

References

- [1] Dittanet P, Pearson RA. Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy. *Polymer*. 2012 Apr 17;53(9):1890-905. doi: 10.1016/j.polymer.2012.02.052
- [2] Liu YL, Hsu CY, Wei WL, Jeng RJ. Preparation and thermal properties of epoxy-silica nanocomposites from nanoscale colloidal silica. *Polymer*. 2003 Aug 1;44(18):5159-67. doi: 10.1016/S0032-3861(03)00519-6
- [3] Mai YW, Yu ZZ. *Polymer nanocomposites*. 2006. Woodhead publishing.;3:6519-28.
- [4] Lepoittevin B, Pantoustier N, Devalckenaere M, Alexandre M, Kubies D, Calberg C, Jérôme R, Dubois P. Poly (ϵ -caprolactone)/clay nanocomposites by in-situ intercalative polymerization catalyzed by dibutyltin dimethoxide. *Macromolecules*. 2002 Oct 22;35(22):8385-90. doi: 10.1021/ma020300w
- [5] Chen C, Justice RS, Schaefer DW, Baur JW. Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer*. 2008 Aug 11;49(17):3805-15. doi: 10.1016/j.polymer.2008.06.023

- [6] Ma J, Mo MS, Du XS, Rosso P, Friedrich K, Kuan HC. Effect of inorganic nanoparticles on mechanical property, fracture toughness and toughening mechanism of two epoxy systems. *Polymer*. 2008 Jul 28;49(16):3510-23. doi: [10.1016/j.polymer.2008.05.043](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.05.043)
- [7] Liang YL, Pearson RA. Toughening mechanisms in epoxy-silica nanocomposites (ESNs). *Polymer*. 2009 Sep 23;50(20):4895-905. doi: [10.1016/j.polymer.2009.08.014](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.08.014)
- [8] Barabanova AI, Philippova OE, Askadskii AA, Khokhlov AR. Transparent epoxy/silica nanocomposites with increased glass transition temperatures. *Procedia Chemistry*. 2012 Jan 1;4:352-9. doi: [10.1016/j.proche.2012.06.049](https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.06.049)
- [9] Dittanet P, Pearson RA. Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy. *Polymer*. 2012 Apr 17;53(9):1890-905. doi: [10.1016/j.polymer.2012.02.052](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.02.052)
- [10] Zappalorto M, Pontefisso A, Fabrizi A, Quaresimin M. Mechanical behaviour of epoxy/silica nanocomposites: Experiments and modelling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015 May 1;72:58-64. doi: [10.1016/j.compositesa.2015.01.027](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.027)
- [11] Kawaguchi T, Pearson RA. The effect of particle-matrix adhesion on the mechanical behavior of glass filled epoxies: Part 1. A study on yield behavior and cohesive strength. *Polymer*. 2003 Jul 1;44(15):4229-38. doi: [10.1016/S0032-3861\(03\)00371-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00371-9)
- [12] Lian TW, Kondo A, Kozawa T, Akoshima M, Abe H, Ohmura T, Tuan WH, Naito M. Effect of hydrophobic nano-silica on the thermal insulation of fibrous silica compacts. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2017 Jun 1;5(2):118-22. doi: [10.1016/j.jascer.2017.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jascer.2017.03.003)
- [13] Pol MH, Liaghat GH, Yeganeh EM, Afrouzian A. Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Apr 1;14(16). [In Persian]
- [14] Aleni HM, Liaghat GH, Pol MH, Afrouzian A. An experimental investigation on mode-II interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy fiber-reinforced laminates. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 May 1;15(3). [In Persian]
- [15] Dueramae I, Jubsilp C, Takeichi T, Rimdusit S. High thermal and mechanical properties enhancement obtained in highly filled polybenzoxazine nanocomposites with fumed silica. *Composites Part B: Engineering*. 2014 Jan 1;56:197-206. doi: [10.1016/j.compositesb.2013.08.027](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.027)
- [16] Tarrío-Saavedra J, López-Beceiro J, Naya S, Artiaga R. Effect of silica content on thermal stability of fumed silica/epoxy composites. *Polymer Degradation and Stability*. 2008 Dec 1;93(12):2133-7. doi: [10.1016/j.polymdegradstab.2008.08.006](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.08.006)
- [17] Battistella M, Cascione M, Fiedler B, Wichmann MH, Quaresimin M, Schulte K. Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008 Dec 1;39(12):1851-8. doi: [10.1016/j.compositesa.2008.09.010](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.010)
- [18] Preghenella M, Pegoretti A, Migliaresi C. Thermo-mechanical characterization of fumed silica-epoxy nanocomposites. *Polymer*. 2005 Dec 12;46(26):12065-72. doi: [10.1016/j.polymer.2005.10.098](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.098)
- [19] Feng J, Yan Y, Chen D, Ni W, Yang J, Ma S, Mo W. Study of thermal stability of fumed silica based thermal insulating composites at high temperatures. *Composites Part B: Engineering*. 2011 Oct 1;42(7):1821-5. doi: [10.1016/j.compositesb.2011.06.023](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.023)
- [20] Dorigato A, D'amato M, Pegoretti A. Thermo-mechanical properties of high density polyethylene-fumed silica nanocomposites: effect of filler surface area and treatment. *Journal of Polymer Research*. 2012 Jun;19:1-1. doi: [10.1007/s10965-012-9889-2](https://doi.org/10.1007/s10965-012-9889-2)
- [21] Lorenzati A, Fantucci S, Capozzoli A, Perino M. The effect of temperature on thermal performance of fumed silica based vacuum insulation panels for buildings. *Energy Procedia*. 2017 Mar 1;111:490-9. doi: [10.1016/j.egypro.2017.03.211](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.211)
- [22] Bok G, Lim G, Park K, Kim Y. Mechanical properties and fracture toughness of fumed silica epoxy composites containing glycidyl terminated polysiloxanes. *Ceramics International*. 2021 Sep 15;47(18):25738-43. doi: [10.1016/j.ceramint.2021.05.300](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.300)
- [23] PS S, Prasad V, Pahovnik D, Thomas S, Haponiuk JT, George SC. Study the effect of fumed silica on the mechanical, thermal and tribological properties of silicone rubber nanocomposites. *Journal of Polymer Research*. 2022 Feb;29(2):53. doi: [10.1007/s10965-022-02905-x](https://doi.org/10.1007/s10965-022-02905-x)
- [24] Garcia-Mejia G, Saavedra-Intriago G, Rigail-Cedeño A, Rivas-Ferrín A, Tapia-Bastidas CV. Effect of silica fume and rice husk silica in bio-epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1;33:2008-12. doi: [10.1016/j.matpr.2020.06.498](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.498)
- [25] Kim KM, Kim H, Kim HJ. Enhancing thermo-mechanical properties of epoxy composites using fumed silica with different surface treatment. *Polymers*. 2021 Aug 12;13(16):2691. doi: [10.3390/polym13162691](https://doi.org/10.3390/polym13162691)
- [26] Maharana SM, Pandit MK, Pradhan AK. Influence of fumed silica nanofiller and stacking sequence on interlaminar fracture behaviour of bidirectional jute-kevlar hybrid nanocomposite. *Polymer Testing*. 2021 Jan 1;93:106898. doi: [10.1016/j.polymertesting.2020.106898](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106898)

- [27] Sarkhosh R, Zarei H. Design, Manufacturing and mechanical and electrical properties evaluation of glass fiber reinforced PTFE polymer matrix composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2021 Jan 10;21(2):117-27. [In Persian]
- [28] Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhabadi A. Design, manufacturing, and evaluation of mechanical and electrical properties of biodegradable epoxy/hemp composite produced by VARTM method. *Journal of Aeronautical Engineering*. 2022 Apr 21;24(1):70-82. doi: 10.22034/joae.2022.315690.1069 [In Persian]
- [29] Talei-Fard, E., Parsa, H., Eskandari Jam, J. Investigation of tensile strength and dielectric constant of GFRP composite. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2021;8(3):1714-08. doi: 10.22068/jstc.2022.546100.1767 [In Persian]
- [30] Rahimi Pishbijari M, Eskandari Jam J, Heydari Beni M. Design and Development of Polymer Based Composite in Order to Minimize the RCS. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2020 Nov 21;7(3):1047-56. doi: 10.22068/jstc.2020.120113.1628 [In Persian]
- [31] Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhabadi A. Experimental investigation of mechanical and electrical properties of semi-biodegradable polypropylene/hemp woven thermoplastic composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jun 22;10(4):62-77. doi: 10.22034/ijme.2023.412380.1820 [In Persian]
- [32] Patel S, Sengupta R, Puntambekar U, Shingne N. Effect of different types of silica particles on dielectric and mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;44:1848-52. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.014
- [33] Khattak A, Imran K, Ali A, Khan ZS, Ulasayar A, Amin M, Khan A, Haq AU. Effects of Compression and Silica Addition on the Dielectric Properties of Epoxy Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 Aug;45(8):6741-50. doi: 10.1007/s13369-020-04686-1
- [34] He X, Rytöluoto I, Anyszka R, Mahtabani A, Saarimäki E, Lahti K, Paajanen M, Dierkes W, Blume A. Surface modification of fumed silica by plasma polymerization of acetylene for PP/POE blends dielectric nanocomposites. *Polymers*. 2019 Nov 28;11(12):1957. doi: 10.3390/polym11121957
- [35] He X, Mahtabani A, Rytöluoto I, Saarimäki E, Lahti K, Paajanen M, Anyszka R, Dierkes W, Blume A. Surface modification of fumed silica by dry silanization for PP-based dielectric nanocomposites. In 2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE) 2019 Apr 7 (pp. 254-259). IEEE. doi: 10.1109/ICEMPE.2019.8727244
- [36] Azizi S, Momen G, Ouellet-Plamondon C, David E. Performance improvement of EPDM and EPDM/Silicone rubber composites using modified fumed silica, titanium dioxide and graphene additives. *Polymer Testing*. 2020 Apr 1;84:106281. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106281
- [37] Thabet A, Salem N. Experimental investigation on dielectric losses and electric field distribution inside nanocomposites insulation of three-core belted power cables. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021 Jan 1;4(1):19-28. doi: 10.1016/j.aiepr.2020.11.002
- [38] ASTM D3039/D3039M. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. *Annu B ASTM Stand*, 2014.
- [39] ASTM D7264/D7264M-15. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. 2015.
- [40] ASTM D5568-14. Standard Test Method for Measuring Relative Complex Permittivity and Relative Magnetic Permeability of Solid Materials at Microwave Frequencies using Waveguide.