مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، ار دیبهشت ۱۲-۱۷، دوره ۱۱، شماره ۲، صص.۳۷– ۵۷



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

رضا سرخوش'\*، محمد کاظمی نصر آبادی'، رضا پارسافر ٔ

۱- عضو هیئتعلمی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- فارغالتحصيل كارشناسي ارشد، دانشكده مهندسي هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوايي شهيد ستاري، تهران، ايران

\* ايميل نويسنده مسئول: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی	نانوذرات فوم سیلیکا در بسیاری از صنایع از جمله صنایع هوافضا، ساختمانی، حمل و نقل، بهداشتی و غیره بهعنوان پرکننده
دریافت: ۴ آذر ۱۴۰۲	مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به سبکی، خواص عایق حرارتی، استحکام فشاری مناسب و کاربرد این پرکننده بهعنوان
پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳	افزایشدهنده ویسکوزیته رزین بهمنظور 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.
کلیدواژگان:	بهمنظور دستیابی به خواص بهینه، نمونههایی با درصد وزنی مختلف ساخته شد. در ادامه جهت تعیین خواص مکانیکی
فوم سيليكا	کامپوزیتهای تولید شده، آزمون کشش و آزمون خمش سهنقطهای و بهجهت تعیین خواص الکتریکی، آزمون ثابت
نانوذرات پرکننده	دیالکتریک انجام شد. در پایان خواص مکانیکی و الکتریکی نمونهها با درصد وزنی مختلف با رزین اپوکسی خالص مقایسه
خواص مکانیکی و الکتریکی	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
ثابت دىالكتريک	مگاپاسکال است. بیشینه استحکام خمشی برای رزین خالص، فوم سیلیکا ۵ و ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با، ۱۰۹، ۸۵ و
تانژانت تلفات	۶۷ مگاپاسکال بهدست آمد. بیشینه ثابت دیالکتریک 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 اندازهگیری 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<sup>1\*</sup>, Mohammad Kazemi Nasrabadi<sup>1</sup>, Reza Parsafar<sup>2</sup>

Faculty Member, Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran
 MSc Graduate, Department of Aerospace Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

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

Original Research PaperReceived: 25 November 2023Accepted: 6 May 2024Fumed 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 of the resin.	Article Information	Abstract
Keywords:Fumed SilicaNanoparticles FillerMechanical And Electrical PropertiesDielectric ConstantLoss TangentLoss TangentSilica And Electrical PropertiesSilica SilicaMultiple SilicaMechanical And Electrical PropertiesDielectric ConstantLoss TangentSilica SilicaMechanical And Electrical PropertiesDielectric ConstantLoss TangentSilica Silica Silica SilicaMechanical And Electrical PropertiesDielectric ConstantLoss TangentSilica Silica	<b>Original Research Paper</b> Received: 25 November 2023 Accepted: 6 May 2024	Funed 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 Funed
	<b>Keywords:</b> Fumed Silica Nanoparticles Filler Mechanical And Electrical Properties Dielectric Constant Loss Tangent	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 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]

رضا سر خوش و همکاران

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

#### 1- مقدمه

نانوکامپوزیت نیز مانند کامپوزیتها از دو یا چند فاز تشکیل می گردند. فاز اول فاز زمینه نانوکامپوزیت و فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر مىباشد. در نانوكامپوزيت تقويت كننده بهمنظور اهداف خاص نظير افزايش مقاومت، هدايت الكتريكي، استحكام، افزايش لزجت و غیره استفاده می گردد. هر چه ذرات یا الیاف درون ماده زمینه توزیع یکنواختتری داشته باشد، نیرویهای اعمالی به کامپوزیت به صورت يكنواختتري به تقويت كنندهها انتقال مي يابد. با توزيع مناسب مواد تقويت كننده درون ماده زمينه خصوصيات كاميوزيت توليد شده مانند استحکام، سفتی، انرژی شکست، هدایت الکتریکی و غیره بهبود مییابد [1]. 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 علی رغم 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، استحكام و چقرمگي زمينه افزايش يافته است؛ اما اضافه نمودن مقادير بيشتر نانوذرات سيليكا، منجر به كاهش استحكام و چقرمگي می شود. 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. علی رغم 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 سانتی گرادی 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 انداره ذرات سیلیکا را روی پارامترهایی چون مدول یانگ، تنش تسلیم، چقرمگی و انرژی شکست مورد مطالعه قرار دادند. نتايج تجربي أنها نشان ميدهد كه افزودن نانوذرات سيليكا تاثير بهسزايي روي تنش تسليم رزين اپوكسي ندارد. البته بايد به اين نكته اشاره کرد در مورد رفتار تنش تسلیم اپوکسی با وجود ذرات سیلیکا، تفاوتهایی در نتایج تحقیق پژوهش گران 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 افرودن 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، ۵/۰، 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 ۱/۵ 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 می یابد. 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 گرازش کردند. النی و

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

رضا سرخوش و همکاران

همکاران [۱۴] اثر نانوسیلیکا روی چقرمگی مود دوم شکست بین لایهای کامپوزیت شیشه/پوکسی 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 [14] 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 بهبودیافته و با افزایش میزان فوم سیلیکا، نرخ کاهش وزن کاهش مىيابد. درحالىكه پس از كاهش وزن پركننده، رفتار تخريب حرارتي رزين فقط مقدار اندكى تحت تأثير ميزان پركننده بوده است. باتیستلا و همکاران [۱۷] رفتار شکست نانوکامپوزیتهای فوم سیلیکا//پوکسی را مورد مطالعه قراردادند. نتایج آنها نشان داد که چقرمگی شکست بهطور قابلتوجهی افزایش یافته است. پرگنلا و همکاران [۱۸] نانوکامپوزیت فوم سیلیکا//پوکسی را از دیدگاه حرارتی- مکانیکی مورد مطالعه قراردادند. کاهش خواص حرارتی-مکانیکی مانند دمای انتقال شیشهای و مدول کششی مشاهده شد. علت این مشاهدات، محدود شدن درجه اتصالالت عرضی تشکیلشده در حین فرایند پخت زمینه، به دلیل افزایش برهم کنش پلیمر-پرکننده است. اما با افزایش میزان پرکننده، خواص رفتار برعکس از خود نشان میدهند که دلیل آن میتواند تحرکات 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. لورزنزاتی 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 توصيف رابطه بين مركز هدايت حرارتي پانل و درجه حرارت متوسط انجام شده است. اين آزمايشها بر روى 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 پلی سیلوکسانهای منتهی به گلیسیدیل یک روش موثر برای تولید نانوکامپوزیتهای اپوکسی با عملکرد بالا است که در آن فوم سیلیکا پراکنده شده است. ساراث و همکاران [۲۳] به بررسی اثر فوم سیلیکا بر خواص مکانیکی، حرارتی و تریبولوژیکی نانوکامپوزیتهای لاستیک سیلیکونی پرداختند. تاثیر 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 رسیدن که این کامپوزیت قابلیت ویژهای در خواص دیالکتریک از جمله ثابت دیالکتریک و تانژانت تلفات دارند. در تحقیقی دیگر سرخوش

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

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

رضا سرخوش و همکا*ر*ان

همکاران [۲۸] به طراحی و ساخت و بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت اپوکسی/ کنف پرداختند. طلعی 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 زیست تخریب پذیر تهیه شده از پلیمر پلی پروپیلن و پارچه الیاف کنف پرداختند. تاثیر انواع ذرات سیلیکا بر خواص دیالکتریک و مکانیکی نانوکامپوزیتهای اپوکسی توسط پاتل و ممکاران [۳۲] بررسی شد. خاتک و همکاران [۳۳] اثرات فشرده سازی و افزودن سیلیکا بر خواص دیالکتریک کامپوزیتهای اپوکسی را مورد ارزیابی قرار دادند. شیائوژن و همکاران [۳۳] نانوکامپوزیتهای جدیدی برای کاربردهای دیالکتریک مبتنی بر پلی پروپیلن/پلی را مورد ارزیابی قرار دادند. شیائوژن و همکاران [۳۳] نانوکامپوزیتهای جدیدی برای کاربردهای دیالکتریک مبتنی بر پلی پروپیلن/پلی را مورد ارزیابی قرار دادند. شیائوژن و همکاران [۳۳] نانوکامپوزیتهای جدیدی برای کاربردهای دیالکتریک مبتنی بر پلی پروپیلن/پلی را مورد ارزیابی قرار دادند. شیائوژن و همکاران [۳۳] نانوکامپوزیتهای جدیدی برای کاربردهای دیالکتریک مبتنی بر پلی پروپیلن/پلی را مورد ارزیابی قرار دادند. شیائوژن و همکاران [۳۳] نانوکامپوزیتهای جدیدی برای کاربردهای دیالکتریک مبتنی بر پلی پروپیلن/پلی را مورد ارزیابی کو-اکتن) پر شده با فوم سیلیکا اصلاح شده توسعه دادند. در پژوهشی دیگر شیائوژن و همکاران [۳۳] مطالعه ای تحت عنوان تاثیر اصلاح سطح فوم سیلیکا بر خواص دیالکتریک پلی پروپیلن/ فوم سیلیکا انجام دادند. عزیزی و همکاران [۳۳] ملاک دره 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 می شود. این فوم سبک دارای خواص عایق حرارتی بالا، مقاومت در برابر ضربات، سختی و مقاومت به فشار است که از آن برای ساخت اجزاي مختلف هوانوردي استفاده مي شود. استفاده از پركننده فوم سيليكا در هوانوردي مي تواند وزن قطعات را كاهش دهد، عملكرد 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 می گردد. علاوه براین 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 أزمون کشش اندازه گیری شدند و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند استحکام خمشی و مدول الاستیک خمشی کامپوزیت از آزمون خمش به دست آمد و در نهایت بهمنظور تعیین و بررسی خواص الکتریکی کامپوزیت، آزمون ثابت دیالکتریک با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه در باند X انجام شد.

#### ۲- مطالعه تجربی

#### ۲-1- 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 دراین پژوهش با نام ایروزیل-۲۰۰ است که خواص فیزیکی و مکانیکی آن مطابق با دادههای فنی در جدول ۲ آورده شده است.

رضا سرخوش و همکا <i>ر</i> ان	سیلیکا	بررسی اثر نانو ذرات فوم سیلیکا بر خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی کامپوزیت پلیمری اپوکسی/ فوم سیلیکا			
	ش	بن اپوکسی مورد استفاده در پژوه	<b>جدول ۱</b> مشخصات رز		
		يزيكى- رزين اپوكسي	خواص ف		
حجم زياد	حجم کم	دمای کاری	<b>Z</b> 1		
۵۰ cm <sup>3</sup>	۶cm <sup>3</sup>	(°C)	ویژ کی		
۲۰ دقیقه	۵۰ دقیقه	۲۵	عمر مصرف (Pot life)		
۲۴ دقیقه	۶۰ دقیقه	۲۵	زمان ژل شدن (Gel time)		
۲۵ دقیقه	۹۰ دقیقه	۲۵	زمان خشک شدن(Curing time)		
۷ روز	۷ روز	۲۵	زمان خشک شدن تا رسیدن به بالاترین استحکام		
		كانيكى- رزين اپوكسى	خواص م		
استاندارد ASTM	واحد	مقدار	ویژگی		
D695M	Kgf/cm <sup>2</sup>	<b>Y</b> 81	مقاومت كششى		
D695M	Kgf/cm <sup>2</sup>	2789.	مدول کششی		

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

مقدار یا نام	ویژگی
فوم سیلیکا-۲۰۰	نام
گرد	ماهیت ظاهری
حدود ۵۰	دانسیته توده (g/l)
$\leq$ 99	مقدار سیلیسیوم دیاکسید(٪)
۵.±۲	مساحت سطح ویژه (m²/g)

### ۲-۲- فرایند آمادهسازی و تولید کامپوزیت

در این مقاله برای ساخت نمونهها از زمینه ثابت رزین اپوکسی EPL-1012 و هاردنر EPH-113 که از شرکت سازه مرکب تهیه شده استفاد 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)

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

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲



رضا سرخوش و همکاران

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

جهت بهدست آوردن خواص مکانیکی با استفاده از آزمونهای کشش و خمش سه نقطه و همچنین بهدست آوردن خواص الکتریکی با استفاده از آزمون ثابت دی الکتریک 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 ۲۰ در ۳۰ سانتیمتر برش زده شد تا ابعاد نمونهها مطابق با استاندارد برای آزمونهای کشش، خمش سهنقطه و دی الکتریک فراهم فراهم شود. برای پایین و بالای قالبها از صفحات فولادی با مخامت 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 سهنقطه و دی الکتریک 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. نانوپرکننده فوم سیلیکا پس از وزن کشی با ترازو با دقت صدم شده است. ترکیب مراد سازوز سازو با دقت صدم نانوپرکننده فوم سیلیکا پس از وزن کشی با ترازو با دقت صدم نانوندرات طی سه مرحله به مخلوط رزین اپوکسی و هاردنر مطابق با جدول ۳ است. نانوپرکننده فوم سیلیکا یس از وزن کشی با ترازو با دقت صدم نانوزرات طی سه مرحله به مخلوط رزین اپوکسی و هاردنر اضافه شد. نانوزرات فوم سیلیکا تا حدی به زمینه رزین اضافه شد که ماده نانوذرات طی سه مرحله به مخلوط رزین اپوکسی و هاردنر اضافه شد. نانوزرات فوم سیلیکا تا حدی به زمینه رزین اضافه شد که ماده نانوذرات طی سه مرحله به مخلوط رزین اپوکسی و هاردن اضافه شد که می توان به عنوان چسب و اتصال دهنده یا پرکننده در سازه، استفاد شود. فوم سیلیکا با دو نوع ویسکوزیته و درصد وزنی متفاوت به تر کیب رزین و هاردنر، افزوده شد تا خواص مکانیکی و سازه، استان می ترین و هاردنر، فروه میلیکی و سازه، استفاد شود. فوم سیلیکا با دو نوع ویسکوزیته و درصد وزنی متفاوت به تر کیب رزین و هاردنر، فروده شدا یک ۳-برمانیکی و سازه، استفاد شود. فوم میلیکا با دو ویسکوزیته مروم میلیکی با در ویسکوزیته مخامی ۳-ده می توان می می را با در می ترون می ۳۰ در ۲۰ سازه، استفاد و شد شده است.





(ب)

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

فوم سيليكا (gr)	هاردنر (gr)	رزين اپوكسى (gr)	مواد	شماره نمونه
_	22/2	10.	رزین اپوکسی خالص	١
٨/۵	22/2	10.	رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا با ۵ درصد وزنی	٢
١٧	۲۲/۵	۱۵۰	رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا با ۹ درصد وزنی	٣

#### جدول ۳ مشخصات و وزن نمونههای ساخته شده در مقاله





(ب)

**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

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

رضا سرخوش و همکاران

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 psi و دمای اتاق ۲۵ درجه، جهت پخت به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد همان طور که در شکل ۴-ب نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فرایند آماده سازی، ساخت و پخت تا رسیدن به مطلوب ترین 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، همان طور که در شکل ۵-الف و شکل۵-ب نشان داده شده است. جهت عملیات پخت نهایی<sup>۱</sup> نمونهها به مدت ۷ روز در دمای محیط قرا گرفتند.





(ب)

**شکل۴** الف) نمونه قالب گیری شده فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ درصد ب) قالب نمونه در دستگاه پرس





میکل ۵ الف) قطعه پخت شده با پر کننده فوم سیلیکا با درصد وزنی ۹ ب) قطعه پخت شده با پر کننده 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 ۱۰۰۰ الی ۵۰۰ میلیمتر بر دقیقه میباشد.





**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 سانتی گراد، رطوبت ۳۵ درصد و سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه انجام شده است که با توجه به استاندارد این سرعت برای بارگذاری شبه استاتیکی مطلوب است. طول نمونه بین دو فک دستگاه آزمون کشش ۱۲۰ میلی متر در نظر گرفته شد، بنابراین ۴۰ میلی متر از بخش بالای نمونه در داخل فک بالا و ۴۰ میلی متر 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 ت<sup>۱</sup> آماده سازی و نصب شد. ابعاد این تبها ۴۰ میلی متر در ۲۵ میلی متر است. تب از جنس نمونه مورد آزمون بوده و پس از برش ابعاد، با ایجاد خراش های خطی و سطحی کم عمق با زاویه 45±، در سطح مشترک آن با نمونه ی آزمایش توسط چسب سیانواکریلات آغشته و تحت فشار ثابت متصل قرار داده شد و به آن زمان داده شد تا به استحکام برسد همان طور که در شکل ۷–الف نشان داده شده است. پس از انجام آزمون، نمونه ها در استحکام کششی نهایی خود داخل دستگاه آزمون کشش دچار شکست شدند همان طور که در شکل ۷–ب نشان داده شده است. نتایج نمودار نیرو–جابجایی در هر لحظه توسط کامپیوتر متصل به دستگاه ضرمان میلی می مراح انش







(الف)

شکل ۷ الف) نحوه قرار گیری 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 تکیه گاه دستگاه خمش سه نقطه ،۳۲ برابر این ضخامت بوده که برابر با ۱۲۸میلیمتر است و طول نمونه باید ۲۰

<sup>1</sup> TAB

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

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

رضا سرخوش و همکاران

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.



۹ 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

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

همكاران	٩	سر خوش	د ضا
0.,	7	0	,

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. זמכ

(۱)  

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$
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 می آید که مقدار آن با معادله ۲ بیان شده است.

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{I^2}$$

در معادله ۲، € بیشینه کرنش در پوسته خارجی تیر و در وسط تیر است و δ میزان خیز وسط تیر است. با توجه به روابط فوق مي توان با استفاده از نمودار نيرو-جابجايي كه از آزمون خمش سه نقطه بدست مي آيد، نمودار تنش-كرنش بيشينه را در پوسته بيروني 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 وتری خمشی'، بازه پیشنهاد شده در استاندارد ۰/۰۰۲ میباشد که از کرنش ۰/۰۰۱ بر روی نمودار شروع شده وتا کرنش ٠/٠٠٣ ادامه مي يابد. بنابراين مدول الاستيك وترى خمشي در اين بازه با استفاده از معادله ٣ محاسبه شده است.

$$E_{f}^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$
(7)  
c, c, c, dipthe begin  $E_{f}^{chord}$  and  $E_{f}^{chord}$  and  $\Delta\epsilon$  or  $\Delta c$  o

۲-۵- آزمون ثابت دیالکتریک

(٢)

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



**شکل ۱۰** دستگاه نتورک آنالیزر

 $= \frac{1}{4bh^2}$ 

٤٦

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Flexural Chord Modulus of Elasticity

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Flexural Scant Modulus Elasticity

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Network Analyzer

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

رضا سرخوش و همکاران

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

استاندارد اندازه گیری مشخصههای دیالکتریک مواد براساس استاندارد ASTM D5568 [۴۰] روش اندازه گیری موجبری دو پورت است. تکنیک موجبری مستطیلی نمونهای از دستهبندی تکنیکهای اندازه گیری 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 می شود. تکنیک های اندازه گیری خط انتقال به طور معمول دقیقتر از تکنیک تک پورتی است. این تکنیک برای اندازه گیری گذردهی الکتریکی نسبی مختلط (ثابت دیالکتریک نسبی و تلف) و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مختلط یک ماده جامد، ایزوتروپیک، مناسب است. این اندازه گیری 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 اندازه گیری 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 همان گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده به صورت دستی برش زده شد. این ابعاد برابر با ابعاد تیغهی دستگاه آزمون در نظر گرفته شدند. نمونهها بایستی تا حد امکان صاف و بدون خميدگي باشند.



شکل ۱۱ نمونههای برش داده شده برای تست دیالکتریک

### 3- نتايج

با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی نمونههای پر شده با نانوذرات فوم سیلیکا با رزین اپوکسی خالص مقایسه شد. اولین نکتهی قابل توجه در نمودارهای تنش-کرنش استحکام تنشی است. همچنین شیب این نمودار در ناحیه الاستیک، بیانگر مدول الاستیک است. هرچقدر شيب اين نمودار بيشتر باشد، مدول الاستيک آن بزرگتر خواهد شد. همچنين لازم به ذكر است كه مساحت زير 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 ۶/۶۷ درصد است. طبق شکل ۱۳ برای ماده رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی، میانگین استحکام کششی ۱۶مگاپاسکال در حداکثر کرنش ۱۶/۵ 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 مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

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

رضا سرخوش و همکاران

است. همان طور که در نمودار تنش – کرنش شکل ۱۲نشان داده شده است نمودار به صورت خطی است و دارای ناحیه الاستیک خطی است و بلافاصله بعد از نقطه تسلیم دچار شکست می گردد. رفتار نمودار تنش – کرنش رزین اپوکسی نشان دهنده این است که رزین به عنوان یک ماده ترد عمل می کند. با افزودن نانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت در کرنش کم تری دچار شکست می گردد و با افزایش مقدار نانوذرات فوم سیلیکا از ۵ درصد به ۹ درصد، کرنش شکست نانوکامپوزیت کاهش می بابد و نانوکامپوزیت می گردد و با افزایش مقدار نانوذرات فوم سیلیکا از ۵ درصد به ۹ درصد، کرنش شکست نانوکامپوزیت کاهش می بابد و نانوکامپوزیت نسبت به رزین خالص تردتر می گردد، همان طور که در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است؛ علت این موضوع می تواند 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 نمونه های رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا در مقایسه با رزین خالص در شکل ۱۵ نشان داده شده است. م نمونه فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، کاهش کرنش و افزایش مدول یانگ بیان گر این موضوع است که با بالابردن میزان نانوذرات فوم نانوذرات فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، کاهش کرنش و افزایش مدول یانگ بیان گر این موضوع است که با بالابردن میزان نانوذرات فوم نمونه فوم سیلیکا به زمینه رزین اپوکسی، نانو ماده مرکب به سمت تردی بیش می رود و دلیل این امر را می توان به تجمع توده های نانوذره با افزایش مقدار نانو نسبت داد که خود زمینه ساز رشد ترک و ایجاد تمرکز تنش در نانوکامپوزیت و شکست ماده در مقدار تنش های کمتر می شود همان طور که در شکل های 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 ۲۰۷۵درصد 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 اتصالالت عرضی تشکیل شده در حین فرایند پخت بستر به دلیل افزایش برهم کنش پلیمر-پرکننده است. در پژوهش پرگنلا و همکاران [۱۸]، کاهش خواص مکانیکی مانند مدول کششی گزارش شده است که نتایج در این مقاله در رابطه با ماده فوم سیلیکا تایید می کند. 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.



شکل۱۳ نمودار تنش-کرنش برای نمونه های رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۵ درصد وزنی

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

رضا سرخوش و همکاران



شکل۱۴ نمودار تنش-کرنش برای نمونههای رزین پر شده با نانو فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی



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





		بتايج حاصل از أزمون كشش	جدول۴ ن	
كرنش (%)	چقرمگی ( <u>KJ</u> )	مدول (GPa)	استحکام کششی (MPa)	نمونه
۰ /۶۷۸	۶/۰۸	۲/۷	١٨	رزين
• /۶۵	۴/۹	$\Upsilon/\Delta$	18	فوم سيليكا ۵٪
• /٣ ١	۱/۵	٣/١	١.	فوم سيليكا ٩٪

سطح زیر نمودار تنش-کرنش در آزمون کشش، مقدار چقرمگی ماده را نشان میدهد، هرچه این سطح بیشتر باشد، ماده دیرتر دچار شکست می گردد. با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده شد که چقرمگی با افزودن فوم سیلیکا به رزین زمینه مقدار چقرمگی کاهش ٤٩ مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

رضا سرخوش و همکا*ر*ان

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

چشم<sup>9</sup>گیری 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 انداره 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 تاثیر بهسزایی روی تنش تسلیم رزین اپوکسی ندارد. البته باید به این نکته اشاره همکاران [۱۰] خلاف این موضوع را نشان میدهد. همچنین کاواکوچی و همکاران [۱۱] در مقایسه ی یک سیستم اپوکسی مشابه با کرد در اوردن ذرات سیلیکا با قطر ۴۲ میکرو، افزایش تنش تسلیم را مشاهده کردند. برای توضیح این مشاهدات، چسبندگی بین نزات 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 نمونده ای را ترای کرش در می از ۹ از ۱۹ این و (۱۰) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه میشود زوایای شکست نمونه ها پس از اتمام آزمون کشش نخواهند بود و استحکام کامپوزیت از استحکام پلیمر خالص کمتر خواهد بود. ناحیه و زاویه شکست نمونهها پس از اتمام آزمون کشش دری نمونهها که از خواص ایوکسی است میباشد.



شکل ۱۷ شکست نمونههای رزین خالص در آزمون کشش



شکل ۱۸ شکست نمونه ها در آزمون کشش الف) رزین پرشده با ۵ درصد وزنی نانوذرات فوم سیلیکا ب) رزین پرشده 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 پرشده با نانوذرات فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ و ۹ درصد به ترتیب در شکل ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است که میانگین استحکام خمشی برای رزین پرشده با نانوذرات فوم سیلیکا با درصد وزنی ۵ و ۳ درصد به ترتیب در شکل ۱۹ و مگاپاسکال است.

مهندسی ساخت و تولید ایران، ار دیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

رضا سرخوش و همکاران

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



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



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

در شکل ۲۱ نمودار نیرو- جابجایی برای نمونههای رزین پرشده 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 زرین کاهش چشم گیری داشته است. این موضوع نشان میدهد که با افزایش درصد وزنی پرکننده به رزین به وزن پرکننده به زمینه رزین کاهش چشم گیری داشته است. این موضوع نشان میدهد که با افزایش درصد وزنی پرکننده به رزین به درلیل کاهش چسبندگی و در نهایت ترد شدن ماده، میزان مقاومت خمشی روند کاهشی داشته است. باتوجه به نمودار تنش-کرنش در آزمون خمش، میتوان گفت در رزین پرشده با فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، مدول الاستیک وتری افزایش داشت، اما استحکام خمشی و در نهایت ترد شدن ماده، میزان مقاومت خمشی روند کاهشی داشته است. باتوجه به نمودار تنش-کرنش در آزمون خمش، میتوان گفت در رزین پرشده با فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، مدول الاستیک وتری افزایش داشت، اما استحکام خمشی و در میزان مقاومت خمشی روند کاهشی داشته است. باتوجه به نمودار تنش-کرنش در معدار کرنش ندر در زین پرشده با فوم سیلیکا ۹ درصد وزنی، مدول الاستیک وتری افزایش داشت، اما استحکام خمشی و درمش ندر به رزین و فوم سیلیکا ۵ درصد،کاهش چشم گیری داشته است. همچنین مشاهده شد با افزودن فوم سیلیکا ۵ درصد، است. در جدول ۵ نتایج آزمون خمش سه نقطه، آورده شده است. نتایج آزمون خمش درصد، استحکام خمشی و کرنش کاهش زیادی داشت. در جدول ۵ نتایج آزمون خمش سه نقطه، آورده شده است. نتایج آزمون خمش سه نقطه، آورده شده است. نتایج آزمون خمش و مرنش کاهش زیادی کاهش زیادی داشت. در جدول ۵ نتایج آزمون خمش سه نقطه، آورده شده است. نتایج آزمون خمش در باز موده و مینیکا به زین زیا پرکیم خوره هده است. نتایج آزمون خمش درصد، است کام خمشی کاهش زیادی کاهش زیان و می سیلیکا به در مدل مده، آمرد مده سه مقطه، آورده شده است. از در مدن به در مدا کاه ش زیاده و مینیکا ی موده سیلیکا کاهش استحکام خمشی کاهش زیادی و مرفی می مرا می می موان به درمی موان پرکی به و میندی می موده در ترکین با نوم سیلیکا، کاهش زیادی است داده شدا مده می مان می کاه می میاندی مردن موای پرکی می موان می می مان مای می موندی می م

<b>جدول ۵</b> نتایج آزمون خمش				
مدول الاستيك وترى(MPa)	حداکثر کرنش	استحکام خمشی (MPa)	نمونه	
۵۳۵۳	•/•79	١٠٩	رزين	
4000	·/· ۲۲۵	1.7	فوم سيليكا ۵٪	
9700	•/••**	۴۳	فوم سيليكا ٩٪	

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

رضا سرخوش و همکاران



شکل ۲۳ شکست نمونهها پس از انجام آزمون خمش سه نقطه

نمودارهای 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 مایکرویو امواج الکترومغناطیسی با بازه فرکانسی ۸ تا ۱۲/۵گیگاهرتز هستند که در ارتباطات ماهوارهای، راداری، فضایی، رادیویی، کنترل ترافیک هوایی و ایستگاههای هواشناسی کاربردهای فراوانی دارد. براساس منحنیهای ثابت دیالکتریک فرکانس X، برای رزین اپوکسی، فوم سیلیکا ۵ دیالکتریک و فرم سیلیکا ۹ درصد وزنی به ترتیب برابر با، ۲۹۵ و ۱۲/۹ و ۱۲/۹ است. بیشینه ثابت دیالکتریک فوم سیلیکا ۵ درصد

رضا سرخوش و همکاران

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

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.



شکل۲۴ نمودار ثابت دیالکتریک-فرکانس نمونههای رزین خالص و رزین پرشده 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، ۱/۶۰ ، ۱/۱۷ و ۲/۲۷ 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 تغییر قابل توجهی نداشته است. میدهد با افزایش درصد وزنی نابوکسی، ۹ درصد تانژانت تلفات رزین اپوکسی ۴۳/۷۵ درصد افزایش یافتهاست که نشان میدهد با افزایش درصد وزنی نابوذرات فوم سیلیکا به ر تانژانت تلفات رزین اپوکسی ۴۳/۷۵ درصد افزایش یافتهاست که نشان میدهد با افزایش درصد وزنی نابوذرات فوم سیلیکا به ۹ تانژانت تلفات افزایش قابل ملاحظهای پیدا کرده است. علت این موضوع می تواند به توزیع یکنواخت ر 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 پرشده با نانوذرات فوم سیلیکا

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

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

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



 $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ 



م الک چک	مدما ٤ : الم آندين	
دى الكبريك	حدول / سابح ارمون	

ثابت مغناطيسي	تانژانت تلفات	ثابت دىالكتريك	نمونه
١/•٨١	•/\۶	۲/۹۵	رزين
١/•٨٩	• / \ Y	<b>T/9Y</b>	فوم سيليكا ۵٪
۱/• YY	• /٣٣	٣/ • ٩	فوم سيليكا ٩٪

در بعضی از مواد، ثابت دیالکتریک و ثابت مغناطیسی به طور همزمان تغییر میکنند و رابطهای بین این دو خصوصیت وجود دارد. به عبارت دیگر، خواص الکتریکی و مغناطیسی یک ماده به یکدیگر وابسته هستند. رابطه بین ثابت دیالکتریک (٤٥) و ثابت مغناطیسی (μ٥) به صورت معادله ۵ است:

که

با توجه به کاربرد وسیع نانوذرات پرکننده فوم سیلیکا در صنعت هوافضا به جهت اتصال پوستهها به یکدیگر، بررسی اثر نانوذرات فوم سیلیکا بر خواص الکتریکی نانوکامپوزیت پلیمری اپوکسی/ فوم سیلیکا از اهمیت ویژهای برخوردار است. بیشترین تاثیر را بر آشکارسازی راداری انواع وسایل پرنده، پارامترهایی مانند شکل هندسی، مواد به کار رفته، پس زمینه و پوششهای طبیعی یا مصنوعی دارد. در مواد جاذب راداری از موادی استفاده میشود که خاصیت دیالکتریکی یا مغناطیسی دارند که در برخورد امواج الکترومغناطیسی، با جذب این امواج، باعث تضعیف و جذب کامل امواج میشود. مطابق جدول ۶، نتایج خواص الکتریکی و مغناطیسی نمونههای استفاده شده در این مقاله نشان میدهد که افزودن پرکننده یانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، تاثیر منفی بر روی خواص الکتریکی و مغناطیسی و مقاله نشان میدهد که افزودن پرکننده یانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، تاثیر منفی بر روی الکتریکی و مغناطیسی و مغناطیسی در این مقاله نشان میدهد که افزودن پرکننده یانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، تاثیر منفی بر روی خواص الکتریکی و مغناطیسی در این مقاله نشان میدهد که افزودن پرکننده یانوذرات فوم سیلیکا به رزین اپوکسی، تاثیر منفی بر روی الکتریکی نسبت به فلزات برخوردار است.

#### ۴- نتیجهگیری

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 میشود، 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. مهمترین 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 میتواند به دلیل افزایش تخلخل و خاصیت شکنندگی بیشتر باشد.

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

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

- رضا سرخوش و همکاران
- 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 نداشته است.

#### فهرست علائم

#### علائم يوناني

ثابت مغناطیسی  $\mu_0$ 

#### 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 (εcaprolactone)/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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [16] Tarrio-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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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
- [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

مهندسی ساخت و تولید ایران، ار دیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

صا سر خوس و همداران	همكاران	9	سرخوش	رضا
---------------------	---------	---	-------	-----

- [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 Develpoment 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, Ulasyar 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. In2019 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 CompositeMaterials. 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.

مهندسی ساخت و تولید ایران، اردیبهشت ۱٤۰۳، دوره ۱۱، شماره ۲

