



Improving Thermal and Mechanical Properties of Polyester Used in Industrial Coils

Hadi Moshrefzadeh-Sani^{1*}, Afshin Zeinedini², Mohamad Ali Etminani³

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.

³Assistant Professor, Department of Chemical Industry, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 10.20.2023

Revised: 12.30.2023

Accepted: 02.12.2024

Keyword:

Polyester

Coil

Thermal Conductivity

Mechanical Properties Thermal

Properties

*Corresponding Author:

Hadi Moshrefzadeh-Sani

Email: hmoshrefzadeh@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Today, the use of polymer materials in the structure of electronic coils is very common. In addition to keeping the electronic components in their position, the polymer material must be able to transfer the generated heat from the heart of the core to the outside and prevent its temperature from rising beyond the permissible limit. Since unsaturated polyester is used in the researched sample, this research aimed to achieve a composition that is comparable to high-quality foreign samples in terms of mechanical and thermal properties. Therefore, the polyester resin was reinforced with different percentages of chopped glass fibres and alumina particles to improve its mechanical and thermal properties and use it in industrial coils. Tensile, bending, thermal conductivity and wear tests were performed on different samples. The results of experimental studies showed that by adding 40% alumina, the heat transfer coefficient of polyester increased from 0.173 to 0.469 W/mK. In addition, for 70% of chopped glass fibres, the thermal conductivity of polyester improved from 0.173 to 0.394 W/mK. Adding alumina particles and glass fibres generally increased the Young's modulus of the composite. However, the tensile strength of the resin was not only not improved but also decreased by adding alumina particles or glass fibres. Different behaviours were observed in the wear test of samples with different percentages of alumina and glass fibres.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, the demand for lightweight materials with high reliability at high and long-term operating temperatures has greatly increased. Currently, polymers are widely used due to their excellent chemical resistance, high glass melting temperature and electrical insulation. The low intrinsic thermal conductivity of polymers leads to failure, shrinkage and reduced life of the equipment made of these materials. One of the methods used to compensate for these defects is the use of fillers. Various studies have been conducted to improve the thermal conductivity of polymer-based composites using fillers. In addition, the review of papers manifested that fillers affect the mechanical properties of the polymers.

In the present research, the effect of fillers on the thermal and mechanical properties of the polyester-based composite was investigated. Crushed glass fibres and alumina were used as filler phases. The effect of different loading content of these fillers on the thermal properties, tensile, bending and wear properties of the composite was studied. Finally, the type of filler and its optimal percentage for exploitation were presented.

Methodology

The matrix phase of the nanocomposites considered in this research consisted of polyester, cobalt and hardener (acid). For every 1000 grams of polyester, 2.5 grams of cobalt and 6.8 ml of hardener (acid) were used. Short glass fibres or alumina were used as filler phases. The glass fibres produced by Joshi China Company have an average length of 1 mm and the alumina particles are produced by Alpha Alumina Company and have a diameter of 75 microns.

The samples used to measure the thermal conductivity should be made in the form of a cylinder or a rectangular cube with a diameter or width greater than 1 cm and a height greater than 11 cm. In this research, a cylinder with a diameter of 25 mm was used as a sample, and a hole with a diameter of 2.5 mm and a depth of 10.5 cm was created in its middle. The tensile samples were made based on the ASTM D638. Figure 1 shows the samples prepared for measuring the thermal conductivity and mechanical properties under tensile loading.



Figure 1. The samples prepared for measuring the thermal conductivity and mechanical properties under tensile loading.

Results and discussion

As can be seen in Figure 1a, the addition of 40% of alumina increases the thermal conductivity of polyester by approximately 171%, while the addition of the same amount of short glass fibres increases the thermal conductivity by less than 70%. To investigate the effect of hybrid fillers, the thermal conductivity of the sample containing 70% of glass fibres and 10% of alumina increased by 141%. In Figure 1b, Young's modulus of composites is plotted versus the weight fraction of alumina and glass fibres. As shown, adding these materials generally increases the Young's modulus of the composite. The reason for the decrease in Young's modulus in the weight fraction of 20% can be attributed to the presence of trapped bubbles between the fibres. The effect of alumina and glass fibre loadings on the flexural strength is illustrated in Figure 1c. This plot shows that adding glass fibres up to a weight fraction of 30% increases the strength, but after that, the strength decreases. In the presence of alumina, first, the flexural strength decreases and then increases. The results obtained for the wear of composites are demonstrated in Figure 1d.

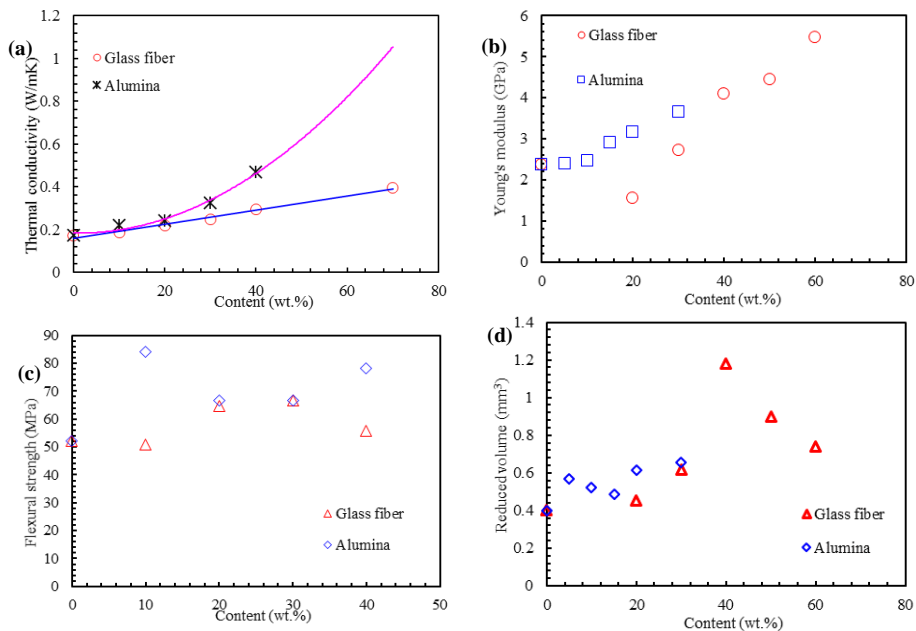


Figure 2. Effect of alumina and glass fibres loading contents on (a) thermal conductivity, (b) Young's modulus, (c) flexural strength and (d) reduced volume in wear test of polyester-based composites.

Conclusion

In the present research, different weight percentages of short glass fibres and alumina particles were added to the polyester resin to calculate the mechanical and thermal properties of polyester-based composite and use it in industrial coils. The thermal conductivity of composites was measured. The samples were tested under tensile and bending loads and their stiffness and tensile strength were determined. In addition, the

effect of particles on the wear of polyester resin was investigated. Some of the results obtained in this research are as follows:

- It was observed that by adding 40% alumina, the thermal conductivity of polyester increased from 0.173 to 0.469 W/mK. Moreover, for 70% of short glass fibres, the thermal conductivity of polyester improved from 0.173 to 0.394 W/mK.
- Adding alumina particles and glass fibres generally increased the Young's modulus of polyester resin.
- It was observed that the tensile strength not only did not improve with the addition of alumina particles or glass fibers but also decreased.
- The results related to the flexural strength showed that adding glass fibres up to 30% increased the strength, but after that, the strength decreased. Dissimilar behaviour was observed for samples reinforced by alumina powder.
- The lowest wear resistance was obtained for the composite containing 40% glass fibres. In the case of the composite containing alumina, it was also observed that the wear resistance improved by adding alumina up to 15%, but after adding more alumina, the wear resistance decreased slightly.

بهبود خواص حرارتی و مکانیکی پلی استر مورد استفاده در کویل‌های صنعتی

هادی مشرفزاده ثانی^{۱*}، افشین زین‌الدینی^۲، محمدعلی اطمینانی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

۳- استادیار، گروه صنایع شیمیایی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۸

پانزنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

کلید واژگان:

پلی استر

کویل

ضریب انتقال حرارت

خواص مکانیکی

خواص حرارتی

امروزه استفاده از مواد پلیمری در ساختار کویل‌های الکترونیکی بسیار متداول است. ماده پلیمری علاوه بر این که اجزای الکترونیکی را در موقعیت خود ثابت نگاه می‌دارد، باید قادر باشد، حرارت ایجاد شده را از قلب هسته به بیرون منتقل کرده و مانع از بالا رفتن درجه حرارت آن به بیش از مقدار حد مجاز شود. از آنجایی که در نمونه مورد تحقیق، از پلی استر غیر اشباع استفاده شده است، هدف این پژوهش رسیدن به ترکیبی است که به لحاظ خواص مکانیکی و حرارتی قابل مقایسه با نمونه‌های خارجی با کیفیت بالا باشد. لذا رزین پلی‌استر با درصدهای مختلفی از الیاف شیشه خرد شده و ذرات آلومینا تقویت شدند تا خواص مکانیکی و حرارتی آن بهبود و در کویل‌های صنعتی به کار برده شود. آزمایش‌های کشش، خمش، رسانندگی گرمایی و سایش بر نمونه‌های مختلف انجام شد. نتایج مطالعات تجربی نشان دادند که با افزودن ۴۰ درصد آلومینا ضریب انتقال حرارت پلی استر از ۰/۱۷۳ به ۰/۴۶۹ وات بر متر در کلونین افزایش یافت. همچنین، به ازای ۷۰ درصد الیاف شیشه خرد شده، ضریب انتقال حرارت پلی استر از ۰/۱۷۳ به ۰/۳۹۴ وات بر متر در کلونین بهبود پیدا کرد. اضافه کردن ذرات آلومینا و الیاف شیشه به طور کلی باعث افزایش مدول یانگ کامپوزیت شدند. در حالی که، استحکام کششی رزین با افزودن ذرات آلومینا یا الیاف شیشه نه تنها بهبود نیافت بلکه کاهش نیز یافت. رفتار متفاوتی در آزمایش سایش نمونه‌ها در درصدهای مختلفی از آلومینا و الیاف شیشه مشاهده گردید.

*نویسنده مسئول: هادی مشرفزاده ثانی

پست الکترونیکی:

hmoshrefzadeh@tvu.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر تقاضا برای مواد سبک با قابلیت اطمینان بالا در دماهای عملیاتی بالا و طولانی مدت بشدت افزایش یافته است. در حال حاضر پلیمرها به دلیل مقاومت شیمیایی عالی، دمای ذوب شیشه‌ای بالا، عایق الکتریکی و قابلیت ترکیب با سایر مواد به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۴]. لذا در ادامه منابعی معرفی می‌شوند که از پرکننده‌ها به منظور بهبود خاصیت رسانایی گرمایی و خواص مکانیکی همچون مدول یانگ و استحکام کششی استفاده نموده‌اند. رسانایی گرمایی ذاتی پایین پلیمرها منجر به شکست، تورق و کاهش عمر تجهیزاتی می‌شود که این مواد در آنها به کار می‌روند [۵]. یکی از روش‌هایی که برای جبران این نواقص به کار می‌رود، استفاده از پرکننده‌هاست. هنگامی که پرکننده‌ها به پلیمر اضافه می‌شوند، گرما می‌تواند به جای پلیمر از طریق پرکننده‌ها (معمولاً هدایت حرارتی بالایی دارند) هدایت شود، که می‌تواند به طور قابل توجهی هدایت حرارتی پلیمر تقویت شده را بهبود بخشد [۶]. رسانایی حرارتی ذرات، سطح بارگذاری، شکل و اندازه ذرات، پراکندگی و جهت‌گیری ذرات، وضعیت سطح مشترک و سایر عوامل تأثیر قابل توجهی بر هدایت حرارتی کامپوزیت پایه پلیمری خواهند داشت. از آنجایی که کامپوزیت‌ها به عنوان پلیمر دی الکتریک استفاده می‌شوند، ذرات رسانا مانند فلز، کربن و گرافیت برای عایق الکتریکی مناسب نیستند. معمولاً از ذرات معدنی مانند اکسید آلومینیوم (آلومینا)، اکسید منیزیم، اکسید سیلیکون، اکسید روی، نیتريد بور، نیتريد آلومینیوم، نیتريد سیلیکون، کاربید سیلیکون، گرافن و نانولوله‌های کربنی تک، دو و یا چندجداره به عنوان پرکننده در کامپوزیت‌های پایه پلیمری استفاده می‌شوند [۷-۹]. تفاوت بین هدایت حرارتی انواع مختلف ذرات معدنی بسیار زیاد است. رسانایی حرارتی الماس می‌تواند ۲۰۰۰ وات بر متر در کلوین باشد، در حالی که رسانایی حرارتی آلومینا حدود ۳۰ وات بر متر در کلوین و سیلیکون کریستالی تنها ۳ وات بر متر در کلوین است. در همان محتوا، هدایت حرارتی سیستم کامپوزیت معمولاً با پر کردن رسانایی حرارتی بالاتر ذرات بیشتر است. نتایج مطالعات محققین نشان می‌دهد به‌منظور افزایش قابل توجه هدایت حرارتی پلیمرها لازم است که هدایت حرارتی ذرات پرکننده حداقل ۱۰۰ برابر بزرگتر از هدایت حرارتی زمینه پلیمری باشد [۱۰]. مطالعات بسیاری در زمینه اثر افزودن ذرات گوناگون با اندازه‌های مختلف بر کامپوزیت‌های پایه پلیمری انجام شده است [۱۱] و آیدوگمس و شها^۱ [۱۲] اثر افزودن نانوذرات آلومینا بر رسانایی گرمایی پلی استر را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه مطالعات تجربی نشان دادند که در حضور ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ درصد از نانوذرات آلومینا مقدار رسانایی گرمایی پلی استر از ۰/۵۶۵ به ترتیب به ۰/۰۵۹۵، ۰/۰۶۴، ۰/۰۶۷ و ۰/۰۷۰ وات بر متر در کلوین افزایش یافت. ویدنفلر^۲ و همکاران [۱۳] پرکننده‌های مختلفی را به پلی پروپیلن اضافه کردند و دریافتند که انواع مختلف پرکننده‌ها تأثیر کمی بر خواص حرارتی کامپوزیت‌ها دارند، در حالی که هدایت حرارتی عمدتاً با توزیع پرکننده‌های رسانایی حرارتی تعیین می‌شود. این محققین مشاهده کردند وقتی میزان پرکننده زیاد باشد، اثر اندازه ذرات بر هدایت حرارتی ضعیف می‌شود، زیرا مسیرهای رسانای گرمایی مؤثر در پلیمر تشکیل شده‌اند و تأثیر اندازه ذرات را می‌توان نادیده گرفت. یافته‌های محققین نشان می‌دهد که اضافه کردن انواع ذرات، اندازه‌ها و شکل‌های مختلف به پلیمرها می‌تواند حفره‌های بین ذرات را کاهش دهد، لذا مسیر هدایت گرما آسان‌تر و لذا هدایت حرارتی نسبتاً بالاتری به دست می‌آید. به‌عنوان مثال، میشرا^۳ و همکاران [۱۴] به‌منظور بهبود رسانایی گرمایی پلی‌استر به کار رفته در مدارهای الکتریکی، در تحقیقی اثر میکروذرات نیتريد بور بر خواص حرارتی پلی‌استر را مورد بررسی قرار دادند. این محققین پارامترهایی همچون اندازه، درصد وزنی و ترکیبی از میکروذرات با اندازه‌های مختلف را به‌عنوان متغیر در نظر گرفتند. این محققین ۰ تا ۳۵ درصد از ذرات نیتريد بور با اندازه‌های ۱، ۳ و ۵ میکرون را به تنهایی و یا به‌صورت ترکیبی به پلی‌استر افزودند. نتایج مطالعات تجربی نشان دادند که کامپوزیت‌های تقویت شده ذرات با اندازه ۱ میکرون کمترین مقدار رسانایی گرمایی و

¹ Aydoğmuş & Şahal² Weidenfeller³ Mishra

کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات ۱ و ۵ میکرون با نسبت ترکیب ۱ به ۳ بالاترین رسانایی گرمایی را در هر درصد وزنی دارد. همچنین مشاهده گردید که در حضور درصدهای کمی از ذرات، مقدار رسانایی گرمایی ثابت یا اندکی افزایش می‌یابد. اما با افزودن درصد بیشتری از ذرات مقدار رسانایی گرمایی حتی تا ۱۰۰ درصد بهبود را نشان می‌دهد. خو^۱ و همکاران [۱۵] از ذرات نیتريد آلومینیوم و کاربید سیلیکون به عنوان پرکننده پلیمرهای پلی وینیلیدین فلوراید یا اپوکسی استفاده کردند. بالاترین رسانایی حرارتی ۱۱/۵ وات بر متر در کلونین با استفاده از وینیلیدین فلوراید و ذرات آلومینیوم نیتريد به دست آمد. این محققین مشاهده کردند که بیشترین هدایت حرارتی برای کامپوزیت با زمینه وینیلیدین فلوراید با بزرگترین اندازه ذرات آلومینیوم نیتريد تعیین گردید. اما با افزایش اندازه این ذرات تخلخل در کامپوزیت افزایش یافت. در تحقیق دیگری چوی و کیم^۲ [۱۶]، ذرات آلومینا و نیتريد آلومینیوم با اندازه‌های مختلف به تنهایی یا به صورت ترکیبی با نسبت‌های مختلف برای تهیه کامپوزیت‌های پلیمری با رسانایی حرارتی مناسب استفاده شدند. از ذرات آلومینا با اندازه‌های ۰/۵ و ۱۰ میکرون و ذرات آلومینیوم نیتريد با اندازه‌های ۱ و ۱۰ میکرون استفاده شد. همچنین سه درصد وزنی از ذرات ۴۲/۲، ۵۳/۵ و ۵۸/۴ درصد به اپوکسی اضافه شدند. نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پرکننده‌های ترکیبی، رسانایی حرارتی کامپوزیت را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش درصد وزنی از ذرات چه به‌صورت ترکیبی و یا به تنهایی رسانایی گرمایی اپوکسی افزایش یافت. بهترین نتیجه نیز موقعی به دست آمد که ذرات آلومینا با اندازه ۰/۵ میکرون و آلومینیوم نیتريد با اندازه ۱۰ میکرون با نسبت ۱ به ۳ به اپوکسی اضافه شدند و رسانایی گرمایی آن را از ۰/۲ به ۳/۴ وات بر متر در کلونین افزایش دادند. سانادا^۳ [۱۷] هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی را با نانولوله‌های کربنی چند جداره، نانوذرات آلومینا و پرکننده‌های کروی آلومینا بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره به اپوکسی منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار هدایت حرارتی این کامپوزیت‌ها می‌شود. وانگ^۴ و همکاران [۱۸] از نانو ورقه‌های نیتريد کربن برای بهبود هدایت حرارتی فیلم‌های کامپوزیت پلی‌آمید استفاده کردند. این محققین درصدهای مختلفی از این نانوذرات را به پلی‌آمید افزودند. حداکثر رسانایی گرمایی ۲/۰۴ وات بر متر در کلونین برای کامپوزیتی به دست آمد که میزان تقویت کننده به ۲۰ درصد وزنی رسید که ۱۱ برابر بیشتر از پلی‌آمید خالص است. تأثیر درصد حجمی نانوذرات بر هدایت حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی/نیتريد بور و کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با ترکیبی از نانوذرات نقره و نیتريد بور توسط وو^۵ و همکاران [۱۹] مورد بررسی قرار گرفت. میزان افزایش رسانایی گرمایی در هر دو مورد برای محتوای کم پرکننده (کمتر از ده درصد حجمی) مشابه است. بیشتر از ۱۰ درصد حجمی نانو پرکننده‌ها، کامپوزیت حاوی نانوذرات نقره و نیتريد بور در مقایسه با کامپوزیت نیتريد بور بهبود هدایت حرارتی زیادی را نشان داد. همچنین مشاهده کردند که با افزایش درصد حجمی نانوذرات در کامپوزیت‌ها، رسانایی حرارتی نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در بالاترین درصد حجمی (۲۵ درصد) بیشترین بهبود رسانایی گرمایی برای هر دو کامپوزیت به دست آمد. در این درصد حجمی، رسانایی گرمایی کامپوزیت اپوکسی/نانوذرات نقره و نیتريد بور ۲/۱۴ وات بر متر در کلونین و تقریباً دو برابر رسانایی گرمایی کامپوزیت اپوکسی/نیتريد بور است. عارویی^۶ و همکاران [۲۰] اثر افزودن نانوذراتی همچون آلومینا و گرافیت بر رسانایی حرارتی، استحکام و مدول کششی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند نتایج نشان دادند که به ازای درصدهای حجمی مختلفی از نانوذرات آلومینا از حدود ۰/۲ درصد تا ۲۰ درصد مقدار رسانایی حرارتی رزین اپوکسی از ۰/۱۹۸ تا ۰/۳۶ وات بر متر در کلونین بهبود می‌یابد. همچنین، مشاهده گردید که در حضور نانوذرات گرافیت یا آلومینا، مدول یا ننگ کامپوزیت افزایش

¹ Xu

² Choi & Kim

³ Sanada

⁴ Wang

⁵ Wu

⁶ Arbaoui

اما استحکام کششی نه تنها افزایش بلکه کاهش می‌یابد. راماجاندران^۱ و همکاران [۲۱] پژوهشی تحت عنوان تأثیر فناوری نانو در افزایش خواص مکانیکی مواد کامپوزیت انجام داد. در این مقاله، در مورد نانو کامپوزیت‌ها و فناوری نانو با استفاده از پرکننده‌ها/ ذرات نانو مانند الیاف باگاس کربنیزه، الیاف کناف، الیاف کربن نانو الیاف نارگیل در اندازه نانو، اکسید روی، سیلیس و غیره در کامپوزیت‌ها بحث شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانو افزودنی‌های ذکر شده در بالا خواص مکانیکی مواد کامپوزیت را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. رضوانی [۲۲] پژوهشی تحت عنوان تأثیر نانو ذرات سیلیس بر خواص مکانیکی رزین‌های کامپوزیت تقویت شده با الیاف انجام داد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد ترکیب نانو ذرات سیلیس در فاز رزین منجر به بهبود استحکام و مدول خمشی محصول نهایی شد. شکرپه و همکاران [۲۳] اثر افزودن مقدار ثابت ۰/۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی چندجداره بر خواص مکانیکی همچون مدول یانگ و استحکام تحت بارگذاری‌های کششی، خمشی و برشی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تمامی خواص مکانیکی به‌طور قابل توجهی افزایش یافتند. لطیف^۲ و همکاران [۲۴] کامپوزیت‌های مبتنی بر پلی استر با درصد‌های حجمی مختلف آلومینا ۰، ۱، ۵ و ۱۰ ساختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که استحکام کششی، مدول یانگ کامپوزیت‌ها با افزایش آلومینا بیشتر و کرنش شکست آنها کمتر خواهد شد. همچنین مطالعات این پژوهش نشان داد که کامپوزیت‌های حاوی ۵ درصد حجمی از ذرات آلومینا بهترین استحکام کششی، سفتی و سختی را دارد. آنها اظهار داشتند که توزیع یکنواخت و پراکندگی ذرات آلومینا دلیل بهبود خواص مکانیکی بوده است. از سوی دیگر، کاهش اندکی در استحکام کششی، سفتی و سختی کامپوزیت‌های با ۱۰ درصد حجمی آلومینا مشاهده شده است. تشکیل کلوخه‌های ذرات و حفره‌ها عامل اصلی کاهش خواص مکانیکی مذکور است. زین‌الدینی و همکاران [۲۵] رفتار کششی نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه اپوکسی با درصد‌های وزنی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی را به روش آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که با اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی چندجداره به رزین، مدول یانگ نمونه افزایش می‌یابد. اما تغییرات مدول با تغییر درصد وزنی، برای درصد‌های وزنی بالای ۰/۳ درصد به صورت غیر خطی است. هرچه درصد وزنی نانولوله‌ها افزایش می‌یابد تغییرات خواص با تغییر درصد وزنی کمتر می‌شود تا جایی که در یک درصد وزنی مشخص (در اینجا ۰/۶)، با افزایش درصد وزنی خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. مشاهدات صورت گرفته از سطوح شکست، به وضوح نشان دادند که با افزایش درصد وزنی مقدار کلوخه‌های تشکیل شده در نمونه افزایش می‌یابد که این بدان معنی است که نانولوله‌ها در نانو مکانیزم‌هایی که خواص نمونه را بهبود می‌بخشد شرکت نمی‌کنند. که این عامل غیر خطی بودن تغییرات خواص با تغییر درصد وزنی فاز نانو در رزین است. عیرفان^۳ و همکاران [۲۶] کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کوتاه شیشه و الیاف کوتاه کربن و یا ترکیبی از آنها به عنوان تقویت کننده و رزین وینیل استر به عنوان ماتریس تهیه شدند. خواص خمشی کامپوزیت‌های ترکیبی و یا تقویت شده با الیاف کربن یا شیشه محاسبه گردید. کامپوزیت‌هایی با الگوهای مختلف الیاف هم‌راستا تهیه و خواص آنها با کامپوزیت‌های حاوی الیاف کوتاه با جهت‌گیری تصادفی مقایسه شد. نتایج نشان داد که عملکرد خمشی نمونه‌های با جهت طولی الیاف به‌طور قابل توجهی بهتر از نمونه‌های جهت‌گیری تصادفی برای همه کامپوزیت‌ها بود. همچنین، مشاهده گردید که کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی خواص خمشی بهتری از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن یا شیشه به تنهایی است. زین‌الدینی و مهدی^۴ [۲۷؛ ۲۸] در مقالاتی که اخیراً به چاپ رساندند نشان دادند که ویژگی‌های هندسی و مکانیکی ذرات پرکننده تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی پلیمرها دارد.

¹ Ramachandran

² Latief

³ Irfan

⁴ Zeinedini & Mahdi

در تحقیق حاضر، اثر پرکننده‌ها بر خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها با زمینه پلی‌استر مورد بررسی قرار گرفت. الیاف شیشه خرد شده و آلومینا به‌عنوان فاز پرکننده به کار رفتند. اثر درصدهای وزنی مختلف این ذرات بر خواص حرارتی، خواص کششی، خمشی و سایش کامپوزیت‌های پایه پلی‌استر مطالعه گردید. براساس استانداردهای موجود نمونه‌های مربوط به آزمایش‌های مختلف ساخته شدند. یافته‌های آزمایشگاهی نشان داد که آلومینا به طور چشمگیری رسانایی حرارتی کامپوزیت را بهبود می‌دهد و استفاده از الیاف شیشه خرد شده بیشترین تأثیر را بر مدول یانگ کامپوزیت دارد. استحکام خمشی پلی‌استر با افزودن هر دو نوع پرکننده افزایش یافت. نمونه‌های حاوی ذرات آلومینا، در مقابل سایش رفتار بهتری را نشان دادند. در ادامه با بررسی روند تغییرات خواص کامپوزیت، درصد بهینه مواد پرکننده جهت بهره‌برداری مشخص شد.

روش انجام آزمایش

مواد مورد استفاده

فاز زمینه کامپوزیت‌های مورد نظر در این تحقیق از پلی‌استر، کبالت و هاردنر تشکیل شده است. به ازای هر ۱۰۰۰ گرم پلی‌استر، ۲/۵ گرم کبالت و ۶/۸ میلی‌لیتر، هاردنر استفاده گردید. الیاف شیشه خرد شده یا آلومینا به‌عنوان فاز پرکننده به کار رفتند. الیاف شیشه سری E تولید شرکت جوشی چین و دارای طول متوسط ۱ میلی‌متر و ذرات آلومینا محصول شرکت آلومینای آلفا و دارای قطر ۷۵ میکرون هستند. مشخصات مکانیکی و حرارتی ماتریس و مواد پرکننده در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و حرارتی ماتریس و مواد پرکننده.

ماده	ضریب انتقال حرارت (W/m.k)	مدول یانگ (GPa)	استحکام نهایی کششی (MPa)
پلی‌استر	۰.۱۷۳	۲.۳۹	۳۵
آلومینا	[۲۹] ۲۸	[۲۹] ۳۷۵	[۳۰] ۲۴۰
الیاف شیشه	[۳۱] ۱.۳	[۳۱] ۸۰.۳	[۳۱] ۳۴۴۵

نحوه توزیع ذرات در رزین

مواد افزودنی که در این مرحله به رزین اضافه گردید شامل الیاف شیشه یا آلومیناست که هر یک به میزان ۱۰٪ وزنی مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا به منظور کمتر شدن گرانروی رزین قبل از اضافه کردن هاردنر، دمای آن توسط همزن مغناطیسی تا ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت (شکل ۱). سپس ماده افزودنی به تدریج و هم‌زمان با چرخش همزن مغناطیسی، به محلول اضافه گردید. حدود نیم ساعت مواد در همزن مغناطیسی با دور متوسط ۵۰ دور بر دقیقه قرار گرفتند، سپس حدود ۱۰ دقیقه همزن خاموش شد و به این ترتیب فرصت کافی برای خروج حباب‌ها به محلول داده شد. مشاهدات به صورت کیفی نشان دادند که پس از گذشت این زمان حباب‌هایی که با چشم قابل مشاهده باشند روی سطح محلول ظاهر نمی‌شوند. سپس هاردنر به محلول اضافه و با یک قاشق به آرامی همزده شد. زمان لازم برای ریختن محلول درون قالب حدود ۳ دقیقه پس از اضافه کردن هاردنر است. زیرا بعد از این مدت زمان، ویسکوزیته محلول افزایش می‌یابد و فرآیند قالب‌گیری بسیار دشوار می‌شود. بعد از ریختن رزین درون قالب با مرتعش کردن قالب یا وارد کردن ضرباتی آرام و پی در پی به آن حباب‌های بزرگ حذف شدند. لازم بذکر است که این ترکیب در ساخت نمونه‌های مربوط به تمامی آزمون‌های انتقال حرارت، کشش، خمش و سایش استفاده گردید.



شکل ۱. اضافه کردن مواد افزودنی به رزین قرار گرفته روی همزن مغناطیسی.

نحوه انجام آزمایش

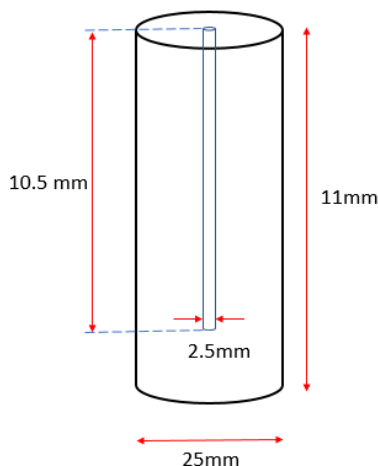
آزمون رسانایی گرمایی

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت کامپوزیت‌های پلیمری، لازم است نمونه‌ها مطابق دستور العمل دستگاه kd2 و استاندارد ASTM E۱۲۲۵ [۳۲] ساخته شوند. این دستگاه که از یک جعبه نمایشگر و یک پروب حرارتی تشکیل شده است (شکل ۲).



شکل ۲. دستگاه kd2 جهت تعیین ضریب انتقال حرارت نمونه‌ها.

نمونه‌های مورد نظر برای آزمون انتقال حرارت به شکل استوانه‌هایی با قطر ۲۵ میلی‌متر که در وسط آن مطابق شکل ۳ سوراخی به قطر ۲/۵ میلی‌متر و عمق ۱۰/۵ سانتی‌متر دارد ساخته شد. لازم به ذکر است که طبق استاندارد، نمونه‌های مورد نظر برای آزمون حرارت باید به شکل استوانه یا مکعب مستطیل به قطر یا عرض بیشتر از ۱ سانتی‌متر و ارتفاعی بیش از ۱۱ سانتی‌متر ساخته شوند.



شکل ۳. شماتیک نمونه ساخته شده جهت استفاده دستگاه kd2.

به منظور ساخت نمونه‌های آزمون انتقال حرارت، لازم است ابتدا قالب مخصوصی ساخته شود. این قالب علاوه بر داشتن شکل مورد نظر باید قادر باشد فشار زیادی را نیز به محتویات درونش وارد کند. به همین منظور از قالب آهنی با مکانیزم سیلندر و پیستون استفاده می‌شود. قسمت سیلندری توسط دستگاه تراش به اندازه مورد نظر تراشیده و صیقل داده شد. قسمت پیستونی شکل نیز از جنس پلی‌آمید انتخاب شد. پیستون توسط ماشین تراش به اندازه‌های تراشیده شد که حرکت آن درون لوله چندان آسان نباشد.

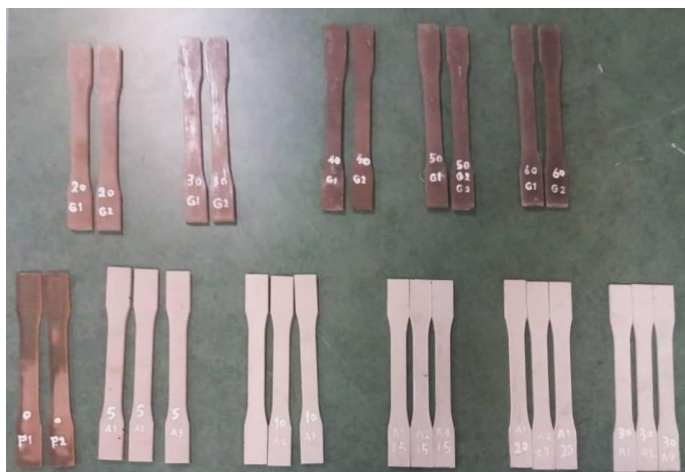
در بخش قبل نحوه توزیع ذرات در رزین پلی استر توضیح داده شد. از دو روش مختلف برای قالب‌گیری نمونه‌ها استفاده گردید تا اثر فشار بر خواص حرارتی نیز بررسی گردد. در روش اول، نمونه‌ها در فشار اتاق قالب‌گیری و در دمای اتاق پخت شدند. در روش دوم، نمونه‌ها تحت فشار و در دمای اتاق قالب‌گیری شدند. در این روش، با قرار دادن درب پیستونی روی قالب و فرار دادن آن درون گیره دستی، محتویات درون قالب تحت فشار قرار گرفتند (شکل ۴). در این شکل تعدادی از نمونه‌های ساخته شده نیز قابل مشاهده هستند.



شکل ۴. قالب تحت فشار و نمونه‌های ساخته شده جهت آزمون انتقال حرارت.

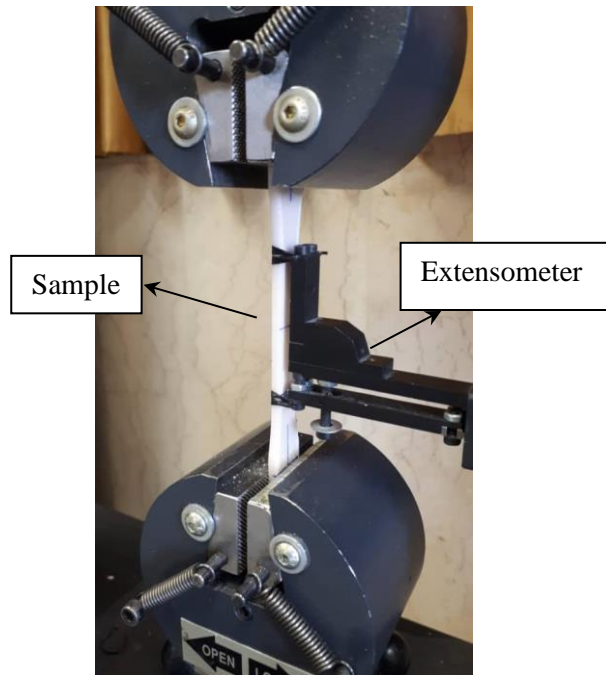
آزمون کشش

آزمون کشش یکی از آزمون‌های مهم جهت مطالعه خواص مکانیکی مواد است. از همین روی در اینجا نمونه‌های آزمایش کشش براساس استاندارد ASTM D638 [۳۳] ساخته شدند. به همین منظور قالب‌های سیلیکونی مطابق این استاندارد ساخته شده و نمونه‌های کامپوزیتی درون این قالب‌ها تولید می‌شوند. در بخش قبل نحوه توزیع ذرات در رزین پلی استر توضیح داده شد. در شکل ۵ نمونه‌های آزمون کشش قبل از انجام آزمایش مشاهده می‌شوند. نمونه‌ها حاوی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی آلومینا و همچنین ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد وزنی، الیاف شیشه خرد شده می‌باشند. نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت پخت شدند.



شکل ۵. نمونه‌های ساخته شده جهت تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تحت بار کششی.

آزمون کشش با استفاده از دستگاه تست کشش یونیورسال ساخت شرکت سننام و با لودسل ۲ تن انجام پذیرفت. سرعت بارگذاری طبق استاندارد ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در تمامی آزمون‌های کشش از اکستنسومتر جهت محاسبه کرنش استفاده گردید. شکل ۶ نمایی از قطعه تحت بارگذاری کششی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمونه قرار گرفته داخل دستگاه سننام جهت بارگذاری تحت کشش.

آزمون خمش

آزمون خمش یکی از آزمون‌های ساده و در عین حال کاربردی است که طبق استاندارد ASTM DV۹۰ [۳۴] انجام می‌شود و به کمک آن می‌توان استحکام و سفتی ماده را محاسبه نمود. در بخش قبل نحوه توزیع ذرات در رزین پلی استر توضیح داده شد. از آنجایی که در خمش یک تیر، قسمت فوقانی آن تحت فشار و قسمت تحتانی آن تحت کشش قرار دارد، نتایج حاصله آمیزه‌های از رفتار ماده تحت کشش و فشار خواهد بود. در آزمون خمش سه نقطه نمونه بر دو تکیه‌گاه استوانه‌ای شکل قرار گرفته و نیرو توسط فک بالایی دستگاه، به وسط تیر وارد می‌شود. فرآیند اعمال نیرو تا لحظه شکست ادامه پیدا کرد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت پخت شدند. در این تحقیق، برای هر ترکیب خاص از کامپوزیت‌ها، سه نمونه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت که نهایتاً میانگین نتایج به دست آمده، مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

آزمون سایش

یکی از آزمون‌های کاربردی در تعیین خواص مکانیکی مواد، آزمون سایش است که در این تحقیق طبق استاندارد ASTM F۷۳۲ [۳۵] انجام شد. در این آزمون نمونه ساخته شده در گیره دستگاه سایش محکم بسته شد و ماسه توسط یک چرخ با روکش لاستیکی روی آن ساییده شد (شکل ۷). بعد از گذشت زمانی مشخص وزن قطعه قبل و بعد از سایش

اندازه‌گیری شده و مقدار جرم (حجم) از دست رفته محاسبه گردید. هرچه مقدار جرم از دست رفته کمتر باشد مقاومت ماده در برابر سایش بیشتر است.



شکل ۷. دستگاه تست سایش استفاده شده در این تحقیق.

نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر مواد افزودنی بر ضریب انتقال حرارت کامپوزیت، نمونه‌هایی با درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ از الیاف شیشه کوتاه و پودر آلومینا ساخته می‌شوند. پس از انجام آزمایش‌ها توسط دستگاه $kd2$ نتایج آن در جداول ۲ و ۳ قابل مشاهده هستند. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود، در حالت قالب‌گیری بدون فشار، اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی آلومینا ۲۶/۶ درصد و الیاف کوتاه شیشه ۴/۶ درصد ضریب هدایت حرارتی را بالا می‌برند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این میان بیشترین تأثیر را آلومینا دارد در حالی که الیاف شیشه به تنهایی تأثیر ناچیزی بر ضریب هدایت حرارتی دارد. همان‌طور که جداول مشاهده می‌شود پودر آلومینا بیشترین تأثیر را بر افزایش ضریب انتقال حرارت دارد و افزودن ۴۰ درصد وزنی آلومینا ضریب انتقال حرارت پلی‌استر را تا ۱۷۱ درصد افزایش می‌دهد در حالی که افزودن همین مقدار از الیاف خرد شده شیشه، ضریب انتقال حرارت را تا حدود ۷۰ درصد بهبود خواهد داد. برای بررسی اثر افزودن هم‌زمان هر دو نوع ذرات، نمونه حاوی ۷۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۱۰ درصد آلومینا ضریب انتقال حرارتی ۱۴۱ درصد افزایش یافت. سایر محققین همچون آیدوگمس و شهال [۱۲]، چوی و کیم [۱۶]، و عاربویی و همکاران [۲۰] نیز مشاهده نمودند که به ازای افزودن ذرات آلومینا خواص حرارتی پلیمرهای پلی‌استر و اپوکسی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

جدول ۲. نتایج ضریب انتقال حرارت برای نمونه‌های تقویت شده با آلومینا.

شماره نمونه	ویژگی نمونه	ضریب انتقال حرارت K (W/m.k)	درصد تغییرات نسبت به پلی استر خالص
۱	پلی استر خالص	۰.۱۷۳	-
۲	۱۰ درصد آلومینا (قالبگیری بدون فشار)	۰.۲۰۸	۲۰.۲۳
۳	۱۰ درصد آلومینا	۰.۲۱۹	۲۶.۶
۴	۲۰ درصد آلومینا	۰.۲۴۲	۳۹.۸۸
۵	۳۰ درصد آلومینا	۰.۳۲۶	۸۸.۴۴
۶	۴۰ درصد آلومینا	۰.۴۶۹	۱۷۱.۱۰

جدول ۳. نتایج ضریب انتقال حرارت برای نمونه‌های تقویت شده با الیاف کوتاه شیشه.

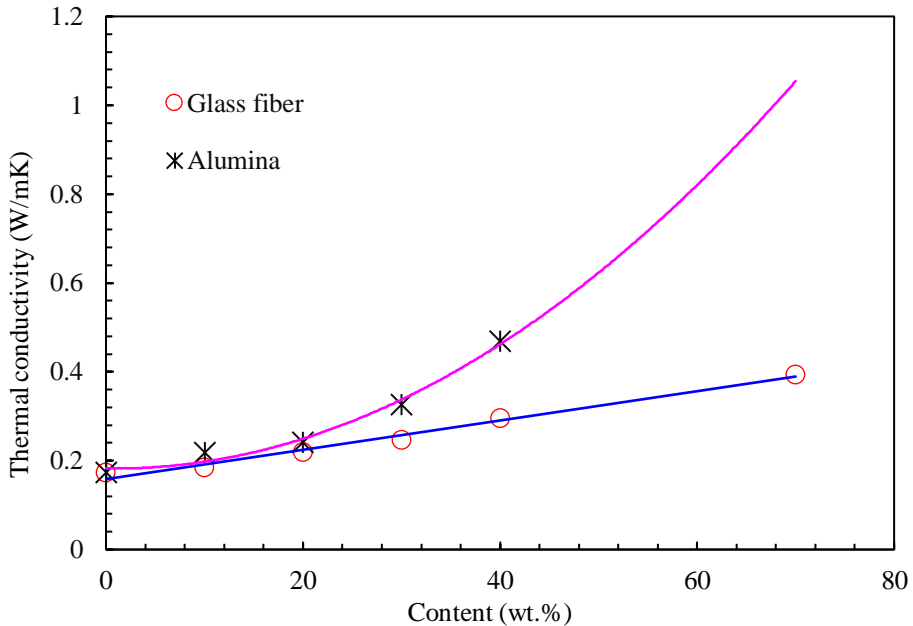
شماره نمونه	ویژگی نمونه	ضریب انتقال حرارت K (W/m.k)	درصد تغییرات نسبت به پلی استر خالص
۱	پلی استر خالص	۰.۱۷۳	-
۲	۱۰ درصد الیاف شیشه خرد شده (قالبگیری بدون فشار)	۰.۱۸۱	۴.۶
۳	۱۰ درصد الیاف شیشه خرد شده	۰.۱۸۴	۶.۳۶
۴	۲۰ درصد الیاف شیشه خرد شده	۰.۲۱۹	۲۵.۵۹
۵	۳۰ درصد الیاف شیشه خرد شده	۰.۲۴۷	۴۲.۷۷
۶	۴۰ درصد الیاف شیشه خرد شده	۰.۲۹۵	۷۰.۵۲
۷	۷۰ درصد الیاف شیشه خرد شده	۰.۳۹۴	۱۲۷.۷

تغییرات ضریب انتقال حرارت کامپوزیت بر حسب درصد آلومینا و الیاف شیشه در نمودار شکل ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از آلومینا مقدار ضریب انتقال حرارت را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. نکته قابل توجه آن است که شیب این تغییرات برای آلومینا به صورت افزایشی (سه‌موی) است. در حالی که افزودن الیاف خرد شده شیشه به پلی استر ضریب انتقال حرارت کامپوزیت را به صورت خطی افزایش می‌دهد. با استفاده از برازش نمودار می‌توان روابط زیر را به ترتیب جهت پیش‌بینی رسانایی گرمایی کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات آلومینا و الیاف شیشه پیشنهاد کرد:

$$k_c = 0.0002W_t^2 - 0.0005W_t + k_m \quad (1)$$

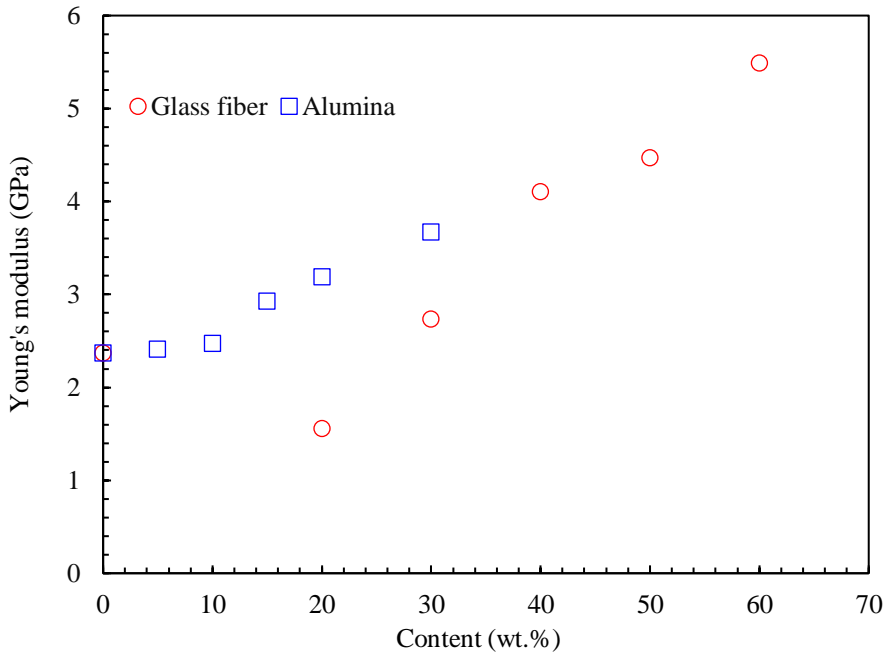
$$k_c = 0.0028W_t + k_m \quad (2)$$

که در آن k_c و k_m به ترتیب رسانایی گرمایی ماده کامپوزیت و زمینه خالص (پلی استر) می‌باشند. به علاوه، W_t درصد وزنی مواد پرکننده است.



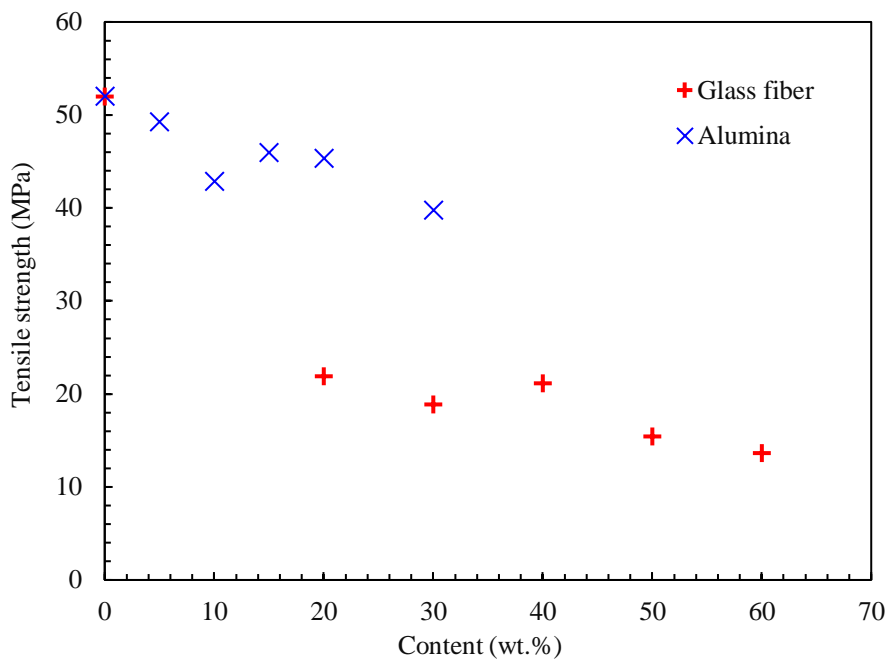
شکل ۸. نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت کامپوزیت‌ها بر حسب درصد آلومینا و الیاف شیشه.

در نمودار شکل ۹ تغییرات مدول یانگ کامپوزیت‌ها بر حسب کسر وزنی آلومینا و الیاف شیشه ترسیم شده است. همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است اضافه کردن این مواد به طور کلی باعث افزایش مدول یانگ کامپوزیت می‌شود. هرچند این افزایش برای الیاف شیشه از شیب بالاتری برخوردار است. لازم به ذکر است که در کسر وزنی ۲۰ درصد از الیاف شیشه مشاهده می‌شود که مقدار مدول یانگ حتی نسبت به پلی استر خالص نیز کمتر شده است ولی با افزودن مقدار الیاف شیشه مدول یانگ مربوطه نیز بیشتر شده تا جایی که در کسر وزنی ۶۰ درصد مدول یانگ نزدیک دو برابر می‌شود. علت کاهش مدول یانگ در کسر وزنی ۲۰ درصد را می‌توان به وجود حباب‌های محبوس شده در بین الیاف نسبت داد. موضوعی که با افزایش کسر وزنی الیاف تحت شعاع قرار گرفته و شاهد جبران آن با افزودن مقادیر بیشتری از الیاف شیشه هستیم.



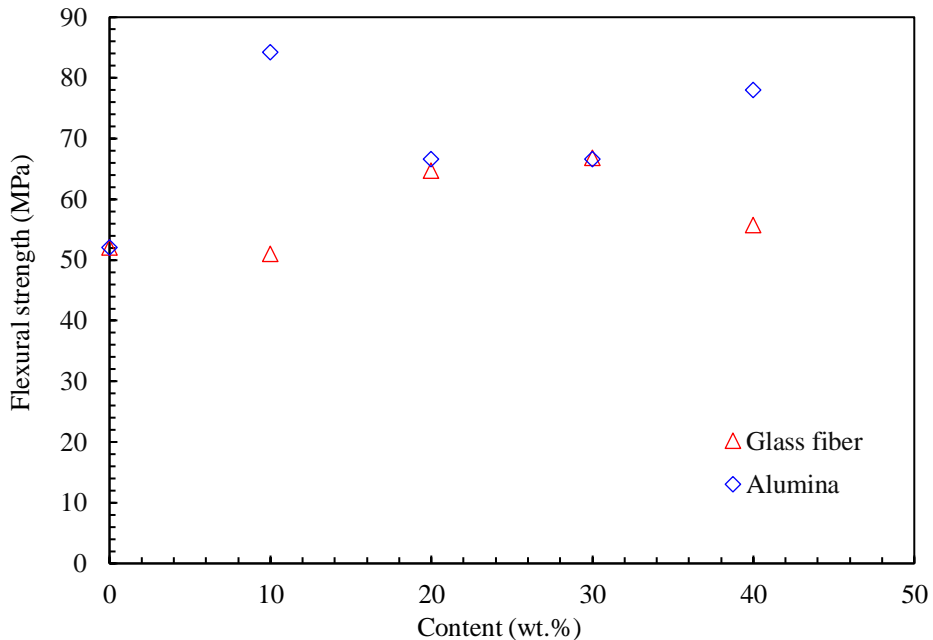
شکل ۹. نمودار تغییرات مدول یانگ کامپوزیت بر حسب کسر وزنی مواد افزودنی به آن.

استحکام کششی بیشترین تنش است که ماده می‌تواند تحمل کند. در واقع استحکام کششی، همان قله منحنی تنش-کرنش ماده است. در نمودار شکل ۱۰ تغییرات استحکام کششی کامپوزیت بر حسب کسر وزنی آلومینا و الیاف شیشه ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود استحکام کششی با افزودن این مواد نه تنها بهبود نیافته بلکه روندی نزولی نیز به خود گرفته است. به وجود آمدن و حبس حباب انواع گازها درون کامپوزیت‌ها بیشترین تأثیر را بر کاهش استحکام ماده داشت. زیرا معمولاً اطراف حباب‌ها تمرکز تنش به وجود آمده و اولین ترک‌ها در همین نواحی تشکیل می‌شود. این ترک‌ها با اعمال کشش بیشتر، رشد کرده، به یکدیگر پیوسته و نهایتاً منجر به شکست کامل قطعه می‌شود. از آنجایی که در پلی‌استر و سخت‌کننده مورد استفاده، زمان پخت کمتر از ۱۰ دقیقه است فرصت کافی جهت خروج حباب‌ها به پلیمر داده نشده و پیش از خروج آنها پلی‌استر منجمد می‌شود. عمل قالب‌گیری تحت فشار می‌تواند باعث کوچک شدن بیشتر حباب‌ها شده و پیوند بین ذرات و پلیمر را قوی‌تر کند در حالی که در این آزمایش، پلی‌استر بدون هیچ‌گونه فشاری و فقط در قالب سیلیکونی مخصوص ریخته می‌شود. در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مقدار کاهش استحکام در صورت استفاده از الیاف شیشه بیش از زمانی است که از آلومینا استفاده می‌شود. علت آن را می‌توان به محبوس شدن مقدار بیشتری از حباب هوا بین الیاف شیشه نسبت داد. زیرا الیاف به خاطر شکل هندسی خود قادرند مقدار بیشتری از حباب را در لابلای خود جای دهند. در خصوص شکل‌های ۱۰ و ۱۱، عاریبی و همکاران [۲۰] نیز مشاهده کردند که با افزایش نسبت حجمی ذرات آلومینا از ۱ به ۵ و ۱۲ درصد، سفتی کششی کامپوزیت از ۳/۲۴ به ترتیب به ۴/۴۸ و ۴/۶۱ گیگاپاسکال افزایش یافت. اما استحکام کششی نه تنها با افزایش نسبت حجمی ذرات آلومینا از ۱ به ۵ و ۱۲ درصد بهبود نیافت بلکه از ۸/۱۶۳ به ترتیب به ۴۷/۵۰ و ۴۶/۵۷ مگاپاسکال کاهش پیدا کرد.



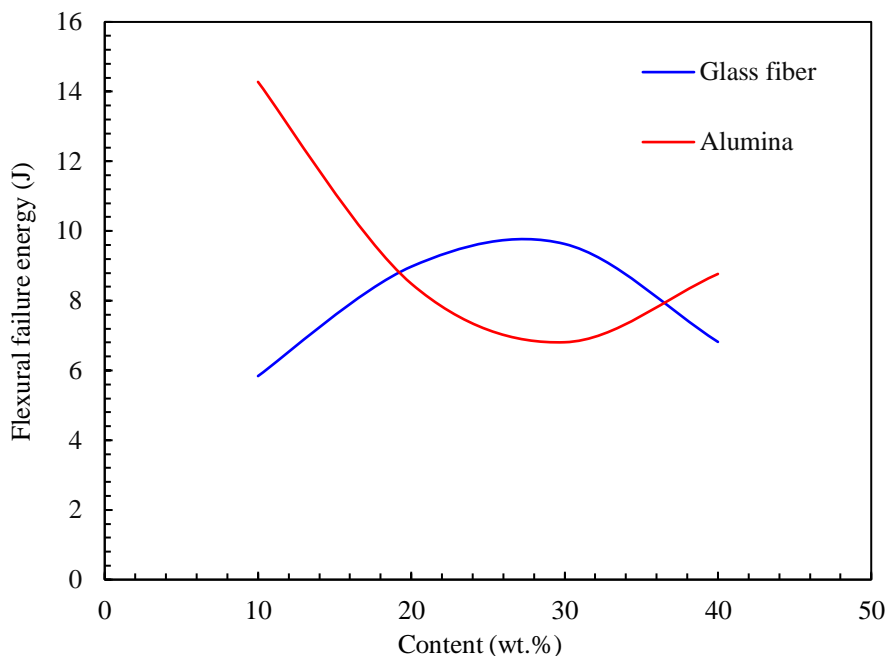
شکل ۱۰. نمودار تغییرات استحکام کششی کامپوزیت بر حسب کسر وزنی مواد افزودنی به آن.

در نمودار شکل ۱۱ ماکزیمم تنش کششی ناشی از خمش (استحکام خمشی) بر حسب کسر وزنی آلومینا و الیاف شیشه ترسیم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف شیشه تا کسر وزنی ۳۰ درصد موجب افزایش استحکام می‌شود ولی بعد از آن استحکام افت می‌کند. برعکس این موضوع در مورد پودر آلومینا صادق است چرا که در ابتدا اضافه کردن آلومینا استحکام را کاهش و سپس مجدداً افزایش می‌دهد.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات استحکام خمشی کامپوزیت بر حسب کسر وزنی مواد افزودنی به آن.

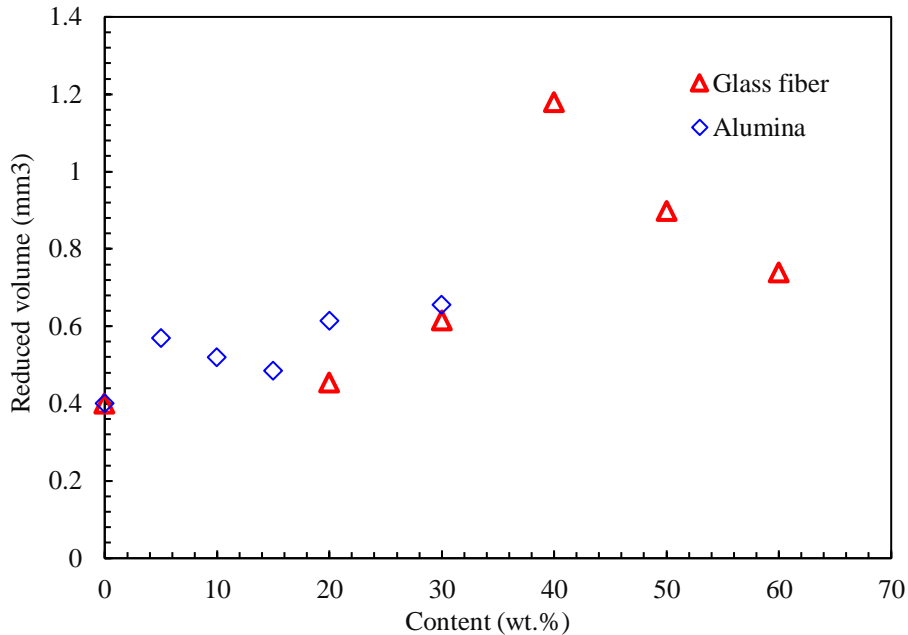
با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-خیز تحت بار خمشی برای هر نمونه، می‌توان انرژی شکست مربوطه را محاسبه نمود. در نمودار شکل ۱۲ انرژی شکست نمونه‌ها بر حسب کسر وزنی مواد افزودنی ترسیم شده است. این نمودار اهمیت زیادی دارد و به کمک آن می‌توان حالتی که بیشترین انرژی شکست را دارد شناسایی کرد. این نمودار نشان می‌دهد که کامپوزیت حاوی ۱۰ درصد وزنی آلومینا بیشتر انرژی شکست را دارد و کمترین انرژی شکست نیز به ازای ۳۰ درصد وزنی از آن به وجود می‌آید این در حالی است که بیشترین انرژی شکست برای کامپوزیت حاوی الیاف شیشه به ازای کسر وزنی ۳۰ درصد به وجود می‌آید رساندن کسر وزنی به ۴۰ درصد موجب کاهش انرژی شکست می‌شود. این موضوع می‌تواند ناشی از حباب‌هایی باشد که با افزایش بیش از حد مقدار الیاف در بین آنها محبوس می‌شوند.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات انرژی شکست نمونه‌های کامپوزیتی تحت بار خمشی بر حسب کسر وزنی مواد افزودنی به آن.

در نمودار شکل ۱۳ جرم کم شده برای قطعات کامپوزیتی بر حسب کسر وزنی آلومینا و الیاف شیشه ترسیم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که کمترین مقاومت در برابر سایش مربوط به کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد الیاف شیشه است. در مورد کامپوزیت حاوی پودر آلومینا نیز مشاهده می‌شود که ابتدا با اضافه کردن آلومینا تا ۱۵ درصد، مقاومت به سایش بهتر شده است ولی بعد از آن اضافه کردن مقدار بیشتری از آلومینا مقاومت سایش تا حدودی کاهش می‌یابد. چنین رفتاری توسط بوزتاپراک^۱ [۳۶] برای کامپوزیت‌های پایه پلی‌استر تقویت شده با ذرات آلومینا مشاهده گردید.

¹ Boztoprak



شکل ۱۳. اثر درصد وزنی پرکننده‌ها بر میزان حجم کم شده از کامپوزیت‌ها در آزمون سایش.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، درصد‌های وزنی مختلفی از الیاف شیشه خرد شده و ذرات آلومینا به رزین پلی‌استر اضافه شدند تا خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت به‌دست آمده محاسبه و در کویل‌های صنعتی به‌کار برده شود. نمونه‌ها تحت بارهای کششی و خمشی آزمایش شدند و سفتی و کششی آنها تعیین شدند. رسانایی گرمایی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه خرد شده و ذرات آلومینا اندازه‌گیری شد. به‌علاوه، اثر ذرات بر سایش رزین پلی‌استر نیز بررسی گردید. بخشی از نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارتند از:

- مشاهده گردید که با افزودن ۴۰ درصد آلومینا ضریب انتقال حرارت پلی‌استر از ۰/۱۷۳ به ۰/۴۶۹ وات بر متر در کلون افزایش یافت. همچنین، به ازای ۷۰ درصد الیاف شیشه خرد شده، ضریب انتقال حرارت پلی‌استر از ۰/۱۷۳ به ۰/۳۹۴ وات بر متر در کلون بهبود پیدا کرد.
- اضافه کردن ذرات آلومینا و الیاف شیشه به طور کلی باعث افزایش مدول یانگ رزین پلی‌استر گردید. نتایج تجربی نشان دادند که با افزودن مقدار الیاف شیشه مدول یانگ مربوطه نیز بیشتر شده تا جایی که در کسر وزنی ۶۰ درصد مدول یانگ نسبت به پلی‌استر حدوداً دو برابر شد.
- ملاحظه گردید که استحکام کششی با افزودن ذرات آلومینا یا الیاف شیشه نه تنها بهبود نیافته بلکه روندی نزولی نیز به خود گرفته است. به وجود آمدن و حبس حباب انواع گازها درون کامپوزیت‌ها بیشترین تأثیر را بر کاهش استحکام ماده داشت.
- نتایج مربوط به استحکام خمشی بر حسب کسر وزنی آلومینا و الیاف شیشه نشان داد که اضافه کردن الیاف شیشه تا کسر وزنی ۳۰ درصد موجب افزایش استحکام گردید ولی بعد از آن استحکام افت نمود. برعکس این

- موضوع در مورد پودر آلومینا صادق است به طوری که در ابتدا اضافه کردن آلومینا استحکام را کاهش و سپس مجدداً افزایش داد.
- کمترین مقاومت در برابر سایش مربوط برای کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد الیاف شیشه به دست آمد. در مورد کامپوزیت حاوی پودر آلومینا نیز مشاهده گردید که ابتدا با اضافه کردن آلومینا تا ۱۵ درصد، مقاومت به سایش بهتر شد ولی بعد از آن اضافه کردن مقدار بیشتری از آلومینا مقاومت سایش تا حدودی کاهش یافت.

References

- [1] Chung, S-L., & Lin, J-S. (2016). Thermal Conductivity of Epoxy Resin Composites Filled with Combustion Synthesized h-BN Particles. *Molecules*, 21(5), 670. <https://doi.org/10.3390/molecules21050670>
- [2] Xiao, M., & Du, B. X. (2016). Review of high thermal conductivity polymer dielectrics for electrical insulation. *High Voltage*, 1(1), 34-42. <https://doi.org/10.1049/hve.2016.0008>
- [3] Xu, Y., Wang, X., & Hao, Q. (2021). A mini review on thermally conductive polymers and polymer-based composites. *Composites Communications*, 24(1), 100617. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100617>
- [4] Zeinedini, A., Hosseini, Y., Mahdi, A. S., Akhavan-Safar, A., & Da Silva, L. F. M. (2024). Impact of the Manufacturing Process on the Flexural Properties of Laminated Composite-Metal Riveted Joints: Experimental and Numerical Studies. *Applied Composite Materials*, 31(2), 583-610. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10186-w>
- [5] Huang, X., Jiang, P., & Tanaka, T. (2011). A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Electrical Insulation Magazine*, 27(4), 8-16. <https://doi.org/10.1109/MEI.2011.5954064>
- [6] Wang, Z., Iizuka, T., Kozako, M., Ohki, Y., & Tanaka, T. (2011). Development of epoxy/BN composites with high thermal conductivity and sufficient dielectric breakdown strength part I - sample preparations and thermal conductivity. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(6), 1963-1972. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.6118634>
- [7] Su, K-H., Su, C-Y., Chi, P-W., Chandan, P., Cho, C-T., Chi, W-Y., & Wu, M-K. (2021). Generation of Self-Assembled 3D Network in TPU by Insertion of Al₂O₃/h-BN Hybrid for Thermal Conductivity Enhancement. *Materials*, 14(2), 238. <https://doi.org/10.3390/ma14020238>
- [8] Shahabaz, S. M., Mehrotra, P., Kalita, H., Sharma, S., Naik, N., Noronha, D. J., & Shetty, N. (2023). Effect of Al₂O₃ and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*, 7(4), 133. <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>
- [9] Dong, Y., Meng, M., Groves, M. M., Zhang, C., & Lin, J. (2018). Thermal conductivities of two-dimensional graphitic carbon nitrides by molecule dynamics simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 738-746. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.017>
- [10] Zhou, W., Qi, S., Tu, C., Zhao, H., Wang, C., & Kou, J. (2007). Effect of the particle size of Al₂O₃ on the properties of filled heat-conductive silicone rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(2), 1312-1318. <https://doi.org/10.1002/app.25789>
- [11] Shokrieh, M. M., & Moshrefzadeh-Sani, H. (2016). On the constant parameters of Halpin-Tsai equation. *Polymer*, 106, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.10.049>

- [12] Aydoğmuş, E., & Şahal, H. (2022). Investigation of Thermophysical Properties of Polyester Composites Produced with Synthesized MSG and Nano-Alumina. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(34), 95-99. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1072831>
- [13] Weidenfeller, B., Höfer, M., & Schilling, F. R. (2004). Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(4), 423-429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.11.005>
- [14] Mishra, D., Dehury, J., Rout, L., & Satapathy, A. (2020). The effect of particle size, mixing conditions and agglomerates on thermal conductivity of BN-polyester & multi-sized BN-hybrid composites for use in micro-electronics. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3187-3192. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.658>
- [15] Xu, Y., Chung, D. D. L., & Mroz, C. (2001). Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(12), 1749-1757. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00023-9)
- [16] Choi, S., & Kim, J. (2013). Thermal conductivity of epoxy composites with a binary-particle system of aluminum oxide and aluminum nitride fillers. *Composites Part B: Engineering*, 51(2), 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.002>
- [17] Sanada, K., Tada, Y., & Shindo, Y. (2009). Thermal conductivity of polymer composites with close-packed structure of nano and micro fillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6-7), 724-730. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.02.024>
- [18] Wang, Y., Zhang, X., Ding, X., Zhang, P., Shu, M., Zhang, Q., Gong, Y., Zheng, K., & Tian, X. (2020). Imidization-induced carbon nitride nanosheets orientation towards highly thermally conductive polyimide film with superior flexibility and electrical insulation. *Composites Part B: Engineering*, 199(7), 108267. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108267>
- [19] Wu, Y., Zhang, X., Negi, A., He, J., Hu, G., Tian, S., & Liu, J. (2020). Synergistic Effects of Boron Nitride (BN) Nanosheets and Silver (Ag) Nanoparticles on Thermal Conductivity and Electrical Properties of Epoxy Nanocomposites. *Polymers*, 12(2), 426. <https://doi.org/10.3390/polym12020426>
- [20] Arbaoui, J., Moustabchir, H., Vigué, J. R., & Royer, F. X. (2016). The effects of various nanoparticles on the thermal and mechanical properties of an epoxy resin. *Materials Research Innovations*, 20(2), 145-150. <https://doi.org/10.1179/1433075X15Y.0000000026>
- [21] Ramachandran, M., Bhargava, R., & Raichurkar, P. (2016). Effect of nanotechnology in enhancing mechanical properties of composite materials. *International journal on Textile Engineering and Processes*, 2(1), 59-63. https://www.researchgate.net/publication/295616526_Effect_of_Nanotechnology_in_Enhancing_Mechanical_Properties_of_Composite_Materials
- [22] Rezvani, M. B., Atai, M., Hamze, F., & Hajrezai, R. (2016). The effect of silica nanoparticles on the mechanical properties of fiber-reinforced composite resins. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 10(2), 112-117. <https://doi.org/10.1517/1/joddd.2016.018>
- [23] Shokrieh, M. M., Zeinedini, A., & Ghoreishi, S. M. (2015). Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites. *Modares Mechanical Engineering*, 15(9), 125-133. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-12211-en.html>

- [24] Latief, F. H., Chafidz, A., Junaedi, H., Alfozan, A., & Khan, R. (2019). Effect of Alumina Contents on the Physicomechanical Properties of Alumina (Al₂O₃) Reinforced Polyester Composites. *Advances in Polymer Technology*, 2019(1), 5173537. <https://doi.org/10.1155/2019/5173537>
- [25] Zeinedini, A., Shokrieh, M. M., & Ebrahimi, A. (2018). The effect of agglomeration on the fracture toughness of CNTs-reinforced nanocomposites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 94, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.01.009>
- [26] Irfan, M. S., Saeed, F., Gill, Y. Q., & Qaiser, A. A. (2018). Effects of hybridization and fiber orientation on flexural properties of hybrid short glass fiber– and short carbon fiber– reinforced vinyl ester composites. *Polymers and Polymer Composites*, 26(5-6), 371-379. <https://doi.org/10.1177/0967391118801608>
- [27] Zeinedini, A., & Mahdi, A. S (2023). Energy dissipated by spherical nanoparticles debonding in nanocomposites under cryogenic and steady state conditions. *Cryogenics*, 136(13), 103763. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2023.103763>
- [28] Zeinedini, A., & Mahdi, A. S. (2023). The effect of temperature on the spherical nanoparticles debonding stress. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 173, 107669. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107669>
- [29] Rodriguez, J. A., & Fernández-García, M. (2007). *Synthesis, Properties, and Applications of Oxide Nanomaterials*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470108975>
- [30] Zheng, J., Li, H., & Hogan, J. D. (2023). Strain-rate-dependent tensile response of an alumina ceramic: Experiments and modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 173, 104487. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104487>
- [31] Takizawa, Y., & Chung, D. D. L. (2016). Through-thickness thermal conduction in glass fiber polymer–matrix composites and its enhancement by composite modification. *Journal of Materials Science*, 51(7), 3463-3480. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9665-x>
- [32] American Society for Testing and Materials. (2020). Standard test method for thermal conductivity of solids using the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique (ASTM E1225-20). ASTM. <https://www.astm.org/e1225-20.html>
- [33] American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638-10). ASTM. <https://www.astm.org/d0638-10.html>
- [34] American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D790-17). ASTM. <https://www.astm.org/d0790-17.html>
- [35] American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Wear Testing of Polymeric Materials Used in Total Joint Prostheses (ASTM F732-17). ASTM. <https://www.astm.org/f0732-17.html>
- [36] Boztoprak, Y. (2022). Effects of Al₂O₃ Particulate Addition on Mechanical Properties of Vinyl Ester Matrix Composite Material. *European Journal of Science and Technology*, 41, 48-53. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1016663>