

Experimental Investigation of Mechanical Properties of Modified Tourmaline on Epoxy/Silica Nanocomposite

Hamid Mozafari ^{a*}, Hadi Yeganehfar ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

^b Department of Geology, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Mozafari H, Yeganehfar H. Experimental Investigation of Mechanical Properties of Modified Tourmaline on Epoxy/Silica Nanocomposite. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;3(4):560-575.

 <https://10.61186/masm.3.4.560>

KEYWORDS

Nanocomposite,
Silica nanoparticles,
Tourmaline,
Mechanical properties,
Epoxy.

ABSTRACT

This study explores the mechanical properties of modified tourmaline in epoxy/silica nanocomposites. The primary objective is to enhance the mechanical characteristics of epoxy/silica nanocomposites by incorporating tourmaline as a reinforcing agent. Initially, the morphology and microstructural features of tourmaline and synthesized silica nanoparticles were examined using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray energy dispersive spectroscopy (EDX) images. The functional groups and chemical bonds of modified tourmaline were identified through Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis. Modified tourmaline micro-particles, acting as a reinforcing phase at weight percentages of 10%, 20%, and 30, were combined with optimized silica nanoparticles at 1% by weight within the epoxy polymer matrix. Various characteristics of tourmaline particles were investigated to assess their impact on the mechanical properties of the nanocomposite. Tensile and three-point bending tests were conducted on the fabricated samples, and the results were analyzed. The findings indicate that incorporating modified tourmaline nanoparticles into the epoxy matrix enhances the mechanical properties of the nanocomposite, with the most significant improvements observed at 20% by weight. Further increases in the weight percentage resulted in reduced mechanical properties due to particle aggregation. Notably, the tensile and bending strengths increased by 35.3% and 22.6%, respectively, under these conditions. This research has the potential to advance the development of superior materials with enhanced mechanical properties.

Extended Abstract

1. Introduction

In today's world, research in the field of nanomaterials is considered a prosperous and attractive area within engineering sciences. Nanocomposites, as novel materials with distinct properties and capabilities, have found broad applications across various industries, including automotive, aerospace, electronics, and medicine [1-3]. Epoxy, a widely utilized material in nanocomposite production, serves as a base matrix that enhances its mechanical and surface properties through nanoparticle incorporation. Epoxy resin is esteemed for its exceptional thermal and mechanical properties, compatibility with diverse fibers and chemicals, and wears resistance. These attributes have positioned epoxy resin for extensive use in applications such as adhesives, coatings, structural materials, and composite matrices. Nevertheless, certain weaknesses of this polymer, such as brittleness, low

* Corresponding author. Tel.: +989161612280

E-mail address: Mozafari.h@pnu.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.3.4.560>

Received: February 01, 2024; Received in revised form: March 07, 2024; Accepted: March 18, 2024

© Author



strength, and susceptibility to crack propagation, have prompted industries to fortify these materials with organic and inorganic fillers [4-7].

Silica is a mineral known for its exceptional properties, particularly when used as a nanoparticle in nanometer dimensions. When combined with epoxy polymer in the form of silica/epoxy nanoparticles, it enhances the mechanical, thermal, and electrical properties of the polymer matrix. The use of silica nanoparticles as a nanometer filler allows for the adjustment of the properties of the polymer matrix [8]. Additionally, these nanoparticles serve as nanometer reinforcements, further improving the mechanical and thermal properties of the polymer matrix [9]. The application of silica/epoxy nanoparticles in various industries such as aerospace, automotive, electronics, and construction has garnered significant attention due to the unique characteristics of this nanocomposite [10-12]. These advanced nanotechnological products offer high performance and optimal characteristics, leading to improved production efficiency, reduced weight, and increased resistance and strength in the final products.

Tourmaline is a mineral with unique properties that can be found in nature as transparent or semi-transparent crystals. This complex silicate contains B and Al, making it known as a hard material that is resistant to heat, thermal and electrical insulation, acids, and possesses suitable lighting properties. As an inorganic nanoparticle with nanometer dimensions, tourmaline can be utilized in the production of nanocomposites and advanced materials [13]. Incorporating tourmaline into polymer matrices such as epoxy, polyester, and polyolefin can enhance the mechanical, thermal, and electrical properties of these materials, thereby improving their overall performance. Due to its exceptional characteristics, tourmaline finds wide applications in various industries, including electronics, automotive, medicine, and construction [14-16]. Ongoing research in using tourmaline as a nanoparticle for enhancing the mechanical and thermal properties of nanocomposites shows promising potential for the development of advanced materials with novel applications and superior performance.

In this context, harnessing the exceptional properties of tourmaline as a mineral has been explored as an effective means to enhance the mechanical properties of nanocomposites. This study initially examined the ideal quantity of silica nanoparticles, followed by an investigation into the impact of incorporating tourmaline nanoparticles into the epoxy matrix on the mechanical properties of the nanocomposite. The findings revealed a significant enhancement in tensile and bending properties, indicating the potential for this modification to improve overall performance. Such research endeavors hold promise for the advancement of materials with superior mechanical properties, positioning them as crucial components across diverse industries.

2. Experimental Section

2.1. Materials and Equipment

In this study, ML-504 epoxy resin from Polyamine Hardening Materials Company was utilized to fabricate the specimens. The curing time of this epoxy polymer and hardener is approximately 60 minutes, providing an optimal duration for air bubbles to escape. Tensile strength testing was conducted in accordance with ASTM D638 standards using a loading rate of 5 mm/min, while three-point bending strength was assessed following ASTM D790 guidelines at a loading rate of 2 mm/min using a Centam model STM-20 machine. The shape and size of particles were examined using a Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with a LEO VP 1455 device. Prior to imaging, samples were coated with a thin layer of platinum to prevent charge accumulation on the surface and ensure high-quality images. Tourmaline, a cyclic silicate mineral containing boron, exhibits a diverse composition and complex structure. Its chemical formula is $\text{NaR}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$. The sodium ion (Na^+) can be substituted by calcium (Ca^{2+}) and potassium (K^+), while the hydroxyl group (OH^-) can also be replaced by fluorine (F^-). Depending on the R composition, tourmaline primarily consists of iron tourmaline, magnesium tourmaline, sodium tourmaline, and lithium tourmaline [17]. The tourmaline utilized in this study was sourced from the southeastern region of Borujerd city in Lorestan province. These tourmalines are found in pegmatites that have intruded into the schists of this locality. As reported by Mir Sephond et al. in 2013, these tourmalines are classified as black iron-bearing types and are known as Schorl [18].

2.2. Preparation of Samples

To create the silica/epoxy nanocomposite samples, 50 grams of bisphenol A-based epoxy resin, combined with a 10% polyamine hardener (equivalent to 5 grams), was utilized. Initially, silica nanoparticles were dispersed in acetone and then sonicated using a 100-watt ultrasonic device for 30 minutes. Subsequently, varying weight percentages of silica nanoparticles (0.5%, 1%, and 1.5%) were individually mixed with the epoxy resin manually

for 5 minutes. The mixture was further stirred at 300 revolutions per minute for 60 minutes using an IKA mechanical stirrer from Germany. Following this, the polyamine hardener was added to the blend and mixed with a magnetic stirrer for 3 minutes before degassing in the respective molds. In the subsequent stage, tourmaline mineral sourced from the Borujerd region in Lorestan province was pulverized into micro-particles using a ball mill method, as illustrated in Figure 1 of the sample images. The ball mill operated at a speed of 220 rpm for a duration of 150 minutes. The modification of pegmatite tourmaline was carried out at 850 degrees Celsius. Magnetic particles were separated using a magnet, and then at weight percentages of 10%, 20%, and 30% (equivalent to 5, 10, and 15 grams respectively), they were individually combined with the optimal nanocomposite of one weight percent silica/epoxy nanoparticle for 30 minutes using a mechanical method at 300 rpm. To prevent clumping of tourmaline micro-particles and to achieve a uniform mixture, the blend was stirred for 60 minutes using an ultrasonic device with a frequency of 50 MHz and a probe range of 0.5. Subsequently, it was placed in an ultrasonic bath for 20 minutes to eliminate air bubbles. Following this, polyamine hardener was added to the mixture and mixed with a magnetic stirrer for 3 minutes, and after degassing, it was injected into standard tensile and bending molds. It's important to note that each sample for tensile and bending strength tests in this research was repeated three times to ensure reliability.

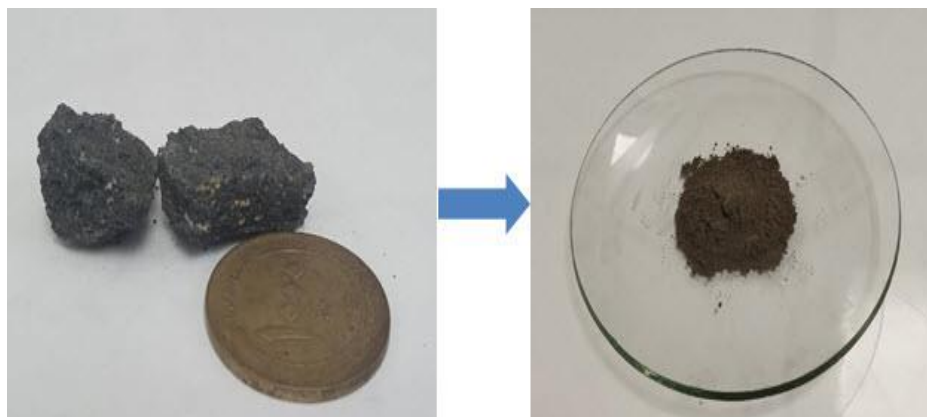


Figure 1. Tourmaline pegmatite mineral pulverized into powder using a ball mill method

3. Result and Discussion

The impact of varying amounts of silica nanoparticles on the tensile and bending strength of polymer epoxy was investigated. Figures 2 and 3 depict the results of these tests. Figure 2 illustrates that an increase in silica nanoparticles up to one percent by weight led to a corresponding increase in tensile modulus and strength of the samples. However, further addition resulted in sample clumping and a subsequent decline in tensile strength. In Figure 3, the addition of silica nanoparticles to the epoxy resin structure notably enhanced bending strength and modulus. Beyond a 1.5% weight ratio of nanoparticles, a decrease in bending strength was observed.

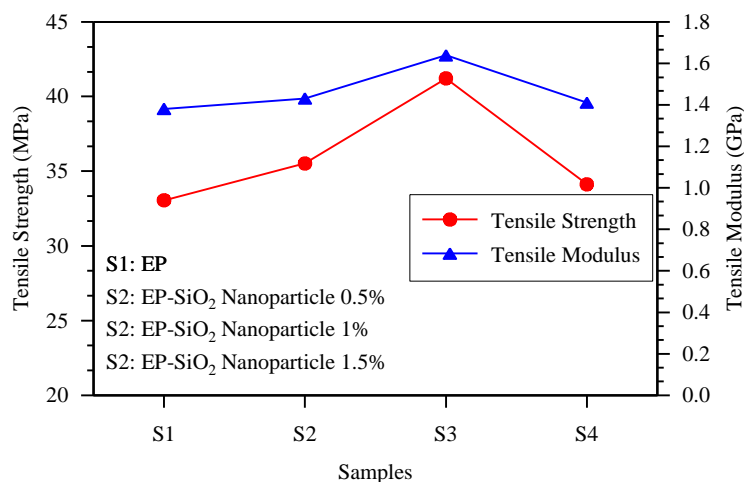


Figure 2. Tensile Properties Diagram of Silica Nanoparticles in Epoxy Polymer

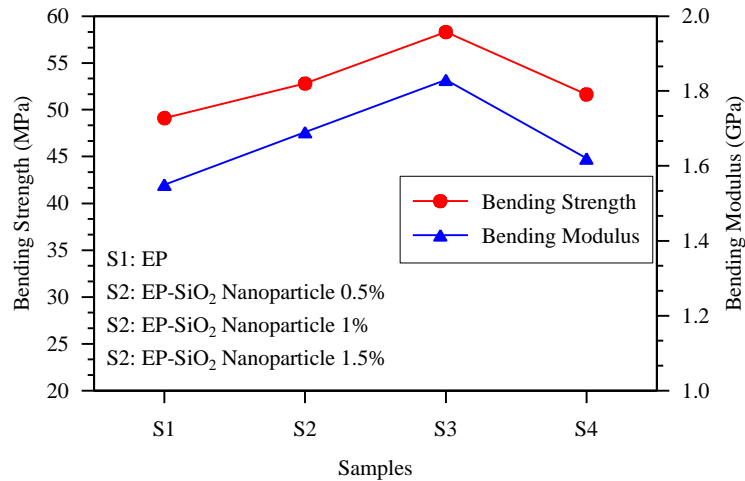


Figure 3. Bending Properties Diagram of Silica Nanoparticles in Epoxy Polymer

In the electron microscope images shown in Figures (a, b), tourmaline mineral micro-particles appear as amorphous crystals ranging from 2 to 8 micrometers in size, exhibiting a range from fine to coarse texture and a greenish-brown hue. Figure (c) presents the results of X-ray energy diffraction spectroscopy (EDX) analysis, identifying the constituent elements of this mineral as per the Schurrell composition, with the formula $\text{NaR}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$. The modification process of pegmatite tourmaline occurred at 850°C , leading to a notable color change attributed to the conversion of divalent iron to trivalent iron, transitioning the crystals from black to brown.

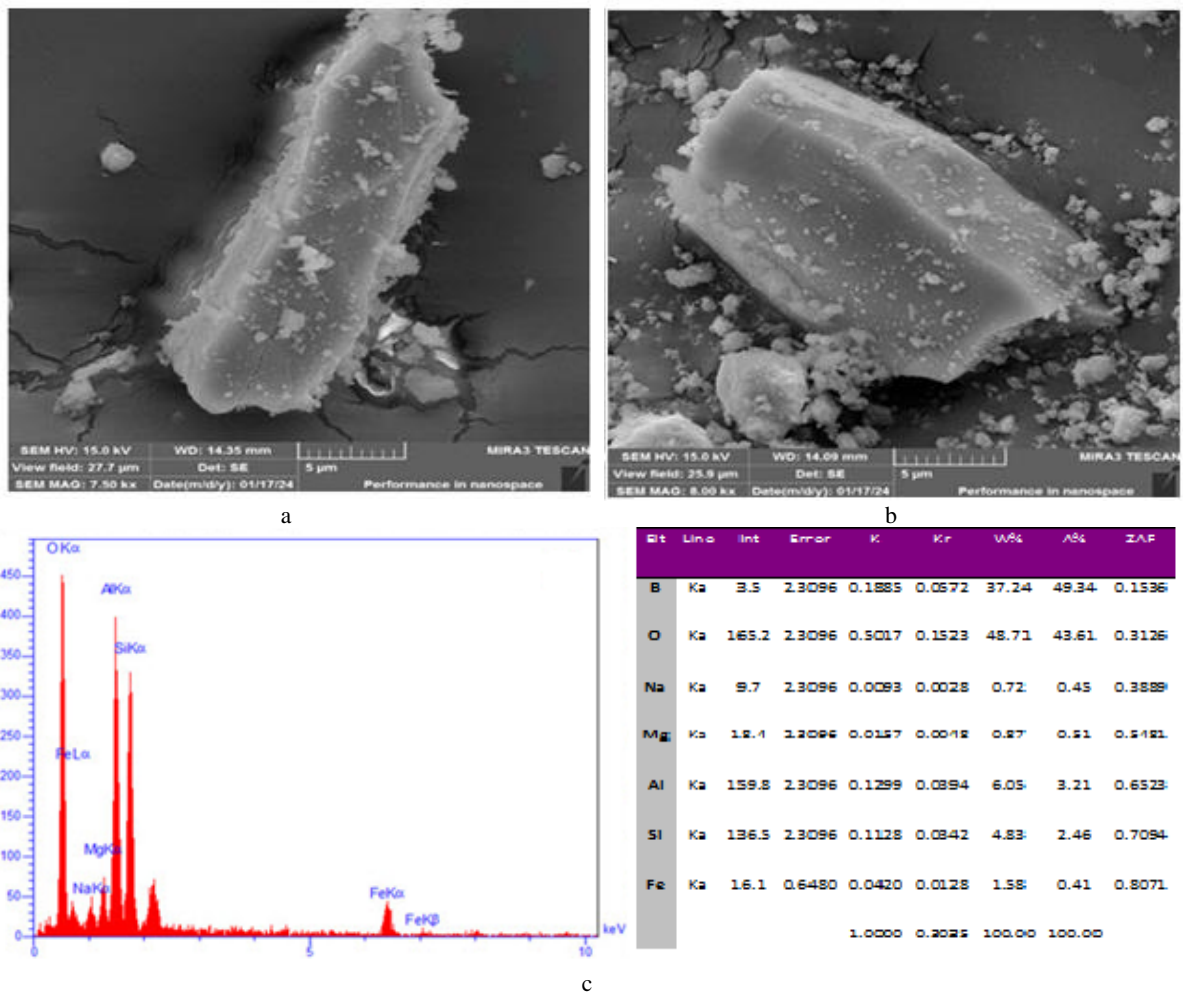


Figure 4. a, b) Electron microscope images, and c) EDX results of modified tourmaline.

The Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis of modified tourmaline micro-particles is depicted in Figure 5. The diagram illustrates the infrared absorption spectrum attributed to the B-O vibration from [BO₃] bonds and Si-O-Si bond vibration formed by [SiO₄]. Absorption peaks at 1618.117 cm⁻¹, 1274.186 cm⁻¹, 1073.163 cm⁻¹, 967.149 cm⁻¹, and 513.103 cm⁻¹ correspond to the B-O stretching vibration and Si-O-Si bond.

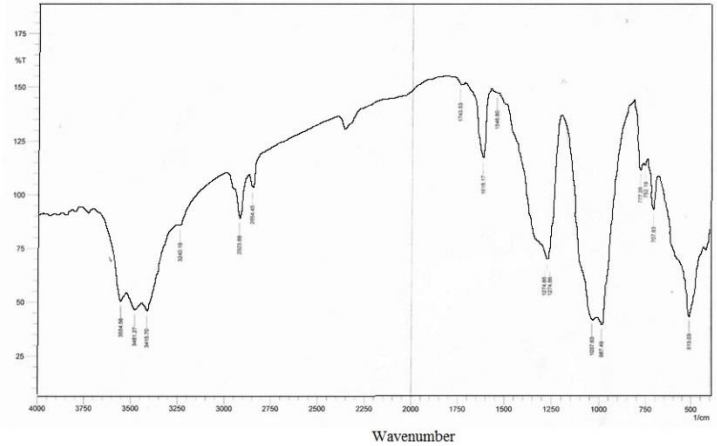


Figure 5. FT-IR results of modified tourmaline.

Figure 6 illustrates the strength and tensile modulus of nanocomposites with varying weight percentages of tourmaline micro-particles modified with the optimal amount of nanosilica/epoxy. It's evident that the tensile modulus of the silica/epoxy nanocomposite increased by 18.8%, accompanied by a 24.7% increase in tensile strength. The addition of modified tourmaline micro-particles enhanced the mechanical properties, with a 28.8% and 35.3% increase in tensile strength and a 24.1% and 33.5% increase in tensile modulus when 10% and 20% weight percentages were added, respectively. However, further increase in the weight percentage led to a decrease in strength due to lumping.

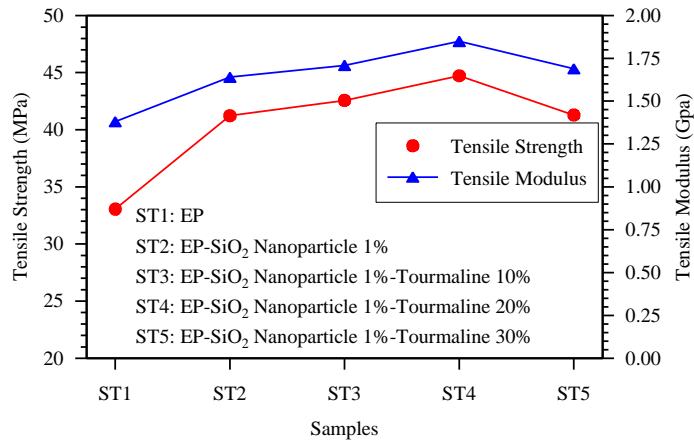


Figure 6. Tensile properties diagram of modified silica/epoxy/tourmaline nanocomposite

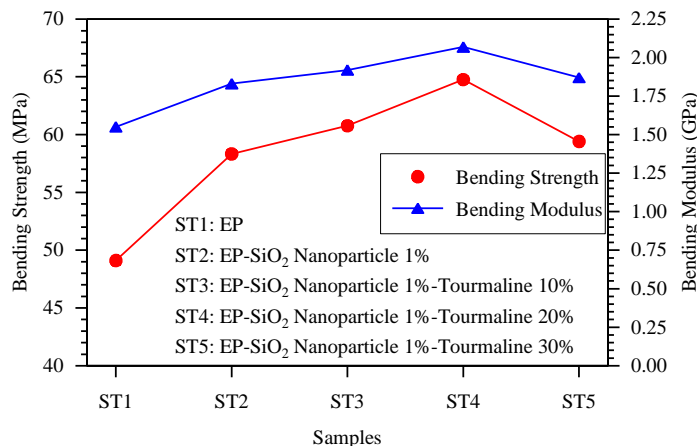


Figure 7. Bending properties diagram of modified silica/epoxy/tourmaline nanocomposite

The three-point bending test results, depicted in Figure 7, indicate a similar trend. Up to a 20% weight addition of modified tourmaline micro-particles, bending properties increased, thereafter declining. Specifically, with 10% and 20% weight additions, the flexural strength increased by 15.1% and 22.6%, and the flexural modulus increased by 23.8% and 34%, respectively.

Figure 8 displays electron microscope images depicting the fracture surfaces of epoxy nanocomposite samples. Specifically, Figure D-8 highlights the clumping areas of the nanocomposite in the sample containing 30% by weight of tourmaline modified with silica/epoxy nanocomposite. Table 1 presents the mechanical properties, including tensile and flexural strength, as well as tensile and flexural modulus, alongside their percentage comparison to pure epoxy. This comparison reveals a decrease in both tensile and flexural strength in the 30% by weight modified tourmaline sample due to nanocomposite clumping, as evidenced in Figure D-8. The highest tensile and bending strength were achieved with a 20% by weight addition of modified tourmaline to the optimized nanocomposite.

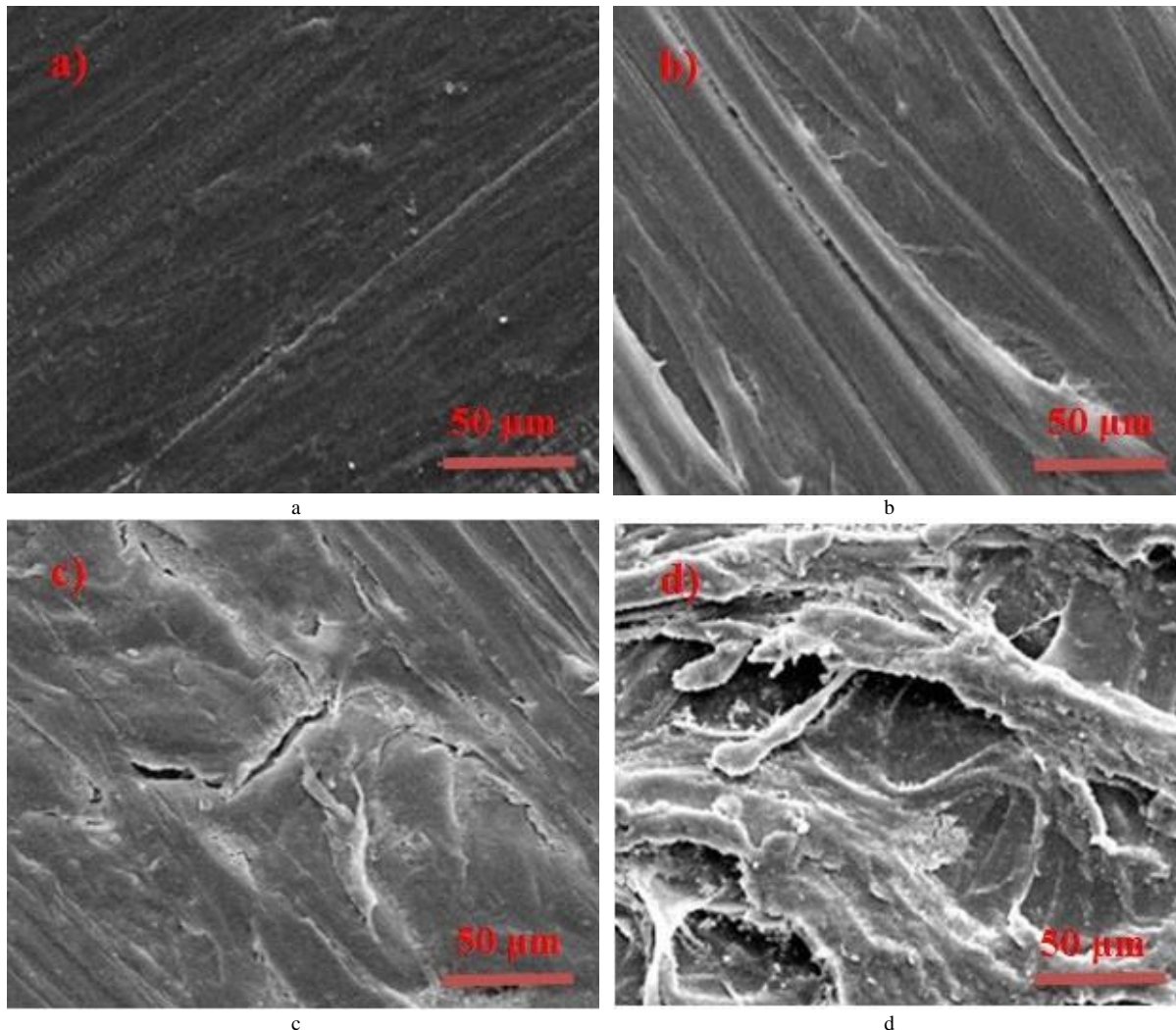


Figure 8. Displays SEM images for samples labeled as: a) ST1, b) ST2, c) ST3, and d) ST4

Table 1. presents the mechanical properties of the samples and compares them with those of pure epoxy polymer

	ST1		ST2		ST3		ST4	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
Tensile Strength	41.22	24.7	42.56	28.8	44.72	35.3	41.28	24.9
Tensile Modulus	1640	18.8	1713	24.1	1857	33.5	1691	22.5
Bending Strength	58.32	10.4	60.76	15.1	64.76	22.6	59.40	12.5
Bending Modulus	1832	18.2	1920	23.8	1077	34	1872	20.7

4. Conclusion

This study investigated the impact of modified tourmaline micro-particles on the mechanical properties of silica/epoxy nanocomposites across various weight percentages. The findings revealed a direct correlation between the weight percentage of modified tourmaline and the tensile and bending strength of the nanocomposite. Specifically, the highest tensile and bending strength were achieved with a 20% weight addition of modified tourmaline micro-particles, along with 1% by weight of silica nanoparticles in epoxy polymer. These results underscore the significance of selecting the appropriate weight percentages of modified tourmaline and silica nanoparticles to enhance the mechanical properties of epoxy/silica composites. Ultimately, this research contributes to the advancement of industrial applications for this nanocomposite material.



بررسی تجربی خواص مکانیکی تورمالین اصلاح شده بر روی نانوکامپوزیت اپوکسی/سیلیکا

حمید مظفری^{الف*}، هادی یگانه‌فر^ب

^{الف} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران، mozafari.h@pnu.ac.ir

^ب استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم‌پایه، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران، h.Yeganehfar@pnu.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
این مقاله به بررسی خواص مکانیکی تورمالین اصلاح شده بر روی نانوکامپوزیت اپوکسی/سیلیکا می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی/سیلیکا با استفاده از تورمالین به‌عنوان فاز تقویت‌کننده است. در ابتدا ریخت‌شناسی و ریزساختار خواص تورمالین به‌دست آمده و نانوذرات سیلیکا تولید شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) و طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) مورد ارزیابی قرار گرفتند. گونه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی تورمالین اصلاح شده توسط آنالیز طیف‌سنج مادون قرمز (FT-IR) آشکارسازی شد. میکروذرات تورمالین اصلاح شده به‌عنوان فاز تقویت‌کننده با درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ همراه با نانوذرات سیلیکا بهینه‌شده که یک درصد وزنی به‌دست آمده، وارد ماتریس پلیمری اپوکسی شده‌اند. خصوصیات مختلف ذرات تورمالین مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش‌های کشش، خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های تهیه شده انجام شده و نتایج به‌دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانوذرات تورمالین اصلاح‌شده به ماتریس اپوکسی باعث بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت می‌شود که با ۲۰ درصد وزنی بالاترین خواص مکانیکی را دارا بود و سپس با افزایش درصد وزنی مواد به علت کلوخه شدن خواص مکانیکی کاهش پیدا کردند. میزان افزایش استحکام کششی و خمشی در این شرایط به ترتیب ۳/۳۵٪ و ۶/۲۲٪ به‌دست آمده است. این تحقیق می‌تواند به توسعه مواد پیشرفته با خواص مکانیکی بهتر کمک کند.	نانو کامپوزیت، نانو ذرات سیلیکا، تورمالین، خواص مکانیکی، اپوکسی.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

۱- مقدمه

در دنیای امروز، تحقیقات در زمینه‌ی نانومواد و نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان یکی از حوزه‌های پر رونق و جذاب در علوم مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان مواد جدید با خواص منحصر به فرد و قابلیت‌های بی‌نظیر، توانسته‌اند در صنایع مختلف مانند خودروسازی، هوافضا، الکترونیک و پزشکی کاربردهای گسترده‌ای داشته باشند [۱-۳]. یکی از مواد پرکاربرد در تولید نانوکامپوزیت‌ها، اپوکسی^۱ به‌عنوان یک ماتریس پایه است که با افزودن نانوذرات به آن، خواص مکانیکی و سطحی آن بهبود می‌یابد. رزین اپوکسی به دلیل خواص ارزشمندی از جمله خواص حرارتی و مکانیکی بسیار خوب، سازگاری با اکثر فیبرها و مواد

^۱ epoxy

شیمیایی، و مقاومت در برابر سایش، به‌عنوان یک ماده جذاب شناخته می‌شود. این خواص باعث شده است که رزین اپوکسی در کاربردهای گسترده‌ای مانند استفاده در چسب، پوشش، مواد ساختاری و به‌عنوان ماتریس کامپوزیت مورد توجه قرار گیرد. با این حال، برخی از نقاط ضعف این پلیمر مانند شکنندگی، استحکام پایین و مقاومت کم در برابر رشد ترک، صنایع را به سمت استفاده از پرکننده‌های آلی و غیرآلی برای تقویت این مواد هدایت کرده است [۴-۷].

سیلیکا^۲ به‌عنوان یک ماده معدنی با خواص استثنایی شناخته شده است که در ابعاد نانومتری به‌عنوان یک نانوذره مفید واقع می‌شود. ترکیب این ماده با پلیمر اپوکسی در فرم نانوذرات سیلیکا/اپوکسی، بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی ماتریس پلیمری را به همراه دارد. نانوذرات سیلیکا به‌عنوان یک پرکننده نانومتری، می‌توانند بهبود قابلیت تنظیم خواص ماتریس پلیمری را فراهم کنند [۸]. همچنین، این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان تقویت‌کننده‌های نانومتری عمل کنند و خصوصیات مکانیکی و حرارتی ماتریس پلیمری را بهبود بخشند [۹]. استفاده از نانوذرات سیلیکا/اپوکسی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی، الکترونیک و ساختمان‌سازی، به دلیل خصوصیات ویژه این نانوکامپوزیت، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. این محصولات نانوتکنولوژیک با خصوصیات بالا و عملکرد بهینه، بهبود زمان و هزینه تولید، کاهش وزن و افزایش مقاومت و استحکام محصولات نهایی را امکان‌پذیر می‌سازند.

تورمالین^۳ یکی از کانی‌ها با خصوصیات بی‌نظیر است که در طبیعت به‌صورت کریستال‌های شفاف یا نیمه شفاف یافت می‌شود. این کانی یک سیلیکات پیچیده بور (B) و آلومینیوم (Al) دار است. تورمالین به‌عنوان یک ماده سخت، مقاوم در برابر حرارت، عایق حرارتی و الکتریکی، مقاوم در برابر اسیدها و با خواص نورپردازی مناسب شناخته شده است. این ماده به‌عنوان یک نانوذره معدنی با ابعاد نانومتری، قابل استفاده در تولید نانوکامپوزیت‌ها و مواد پیشرفته است [۱۳]. افزودن تورمالین به ماتریس‌های پلیمری مانند اپوکسی، پلی‌استر^۴ و پلی‌ولفین^۵، می‌تواند خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی این مواد را بهبود بخشد و عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد. با توجه به خصوصیات منحصر به فرد تورمالین، این ماده در صنایع مختلف از جمله صنایع الکترونیک، خودروسازی، پزشکی و ساختمان‌سازی کاربردهای گسترده‌ای دارد [۱۴-۱۶]. همچنین، تحقیقات جدید در زمینه‌ی استفاده از تورمالین به‌عنوان یک نانوذره در تولید نانوکامپوزیت‌ها به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این مواد، امیدوارکننده به تولید مواد پیشرفته با کاربردهای نوین و عملکرد بالاتر هستند.

در این راستا، اصلاح تورمالین به‌عنوان یک کانی با خصوصیات برجسته، به‌عنوان یک روش اثرگذار برای بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، ابتدا مقدار بهینه نانوذرات سیلیکا و سپس تأثیر افزودن نانوذرات تورمالین به ماتریس اپوکسی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که این اصلاح می‌تواند بهبود قابل توجهی در خصوص خواص کششی و خمشی ایجاد کند. این تحقیقات می‌توانند به توسعه مواد پیشرفته با خصوصیات مکانیکی برتر کمک کنند و جایگاه بسیار مهمی در صنایع مختلف داشته باشند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه‌ها

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی ML-504 شرکت مواد مکرر و سخت‌کننده پلی آمین استفاده شده است. مدت‌زمان ژل شدن این پلیمر اپوکسی و سخت‌کننده حدود ۶۰ دقیقه می‌باشد که زمان مناسبی برای خروج حباب‌های هوا در آن است. برای آزمایش استحکام کششی مطابق با استاندارد ASTM D638 با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه و همچنین جهت آزمایش مقاومت خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM D790 با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه سنتام^۶ مدل STM-20 انجام گرفت. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از دستگاه LEO مدل VP 1455 جهت بررسی شکل و اندازه ذرات استفاده شده است که قبل از گرفتن عکس‌ها، نمونه‌ها توسط یک لایه نازک پلاتین پوشانده شدند تا

^۲ silica

^۳ Tourmaline

^۴ polyester

^۵ polyolefin

^۶ Centam

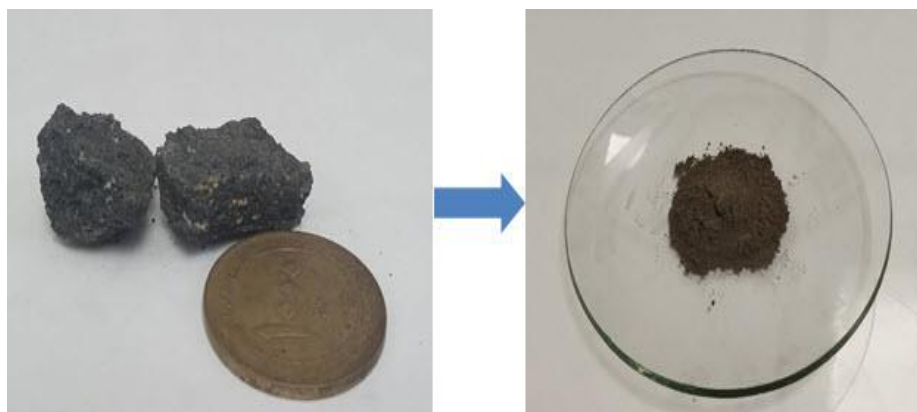
سطح نمونه‌ها از تجمع بار جلوگیری شود و دارای کیفیت بهتری باشند.

تورمالین، از جمله کانی‌های سیلیکات حلقوی دارای بور با ترکیب متنوع و ساختار پیچیده است. تورمالین دارای فرمول شیمیایی $\text{NaR}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$ است. یون سدیم (Na^+) قابل جایگزینی با کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) است، و گروه هیدروکسیل (OH) نیز می‌تواند با فلوئور (F^-) جایگزین شود با توجه به ترکیب R، تورمالین عمدتاً شامل تورمالین آهن‌دار، تورمالین دارای منیزیم، تورمالین سدیم دار، تورمالین لیتیم دار می‌باشد [۱۷].

تورمالین استفاده شده در این مطالعه از جنوب شرق شهرستان بروجرد در استان لرستان برداشت شده‌اند. این تورمالین‌ها در پگماتیت‌هایی^۷ که درون شیست‌ها^۸ این ناحیه نفوذ کرده‌اند، دیده می‌شوند. به نظر میرسد سپهوند و همکاران در سال ۱۳۹۱ این تورمالین‌ها از انواع آهن‌دار سیاه رنگ با نام شورل (Schorl) می‌باشند [۱۸].

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی ۵۰ گرم رزین اپوکسی بر پایه بیسفنول A^۹ با ۱۰٪ سخت‌کننده پلی آمینی معادل ۵ گرم استفاده شد. در ابتدا نانوذرات سیلیکا در استون اضافه گردید سپس توسط دستگاه آلتراسونیک^{۱۰} با توان ۱۰۰ وات به مدت ۳۰ دقیقه توزیع گردید. مرحله بعد برای پیدا کردن مقدار بهینه نانوذرات سیلیکا با درصدهای وزنی ۱٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ جداگانه در رزین اپوکسی ترکیب گردید و به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی هم زده می‌شود. سپس به مدت ۶۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه با استفاده از همزن مکانیکی ساخت شرکت IKA آلمان ترکیب می‌شود. سپس سخت‌کننده پلی آمین را به مخلوط اضافه کرده و به مدت ۳ دقیقه با همزن مغناطیسی ترکیب شد و بعد از گاز زدایی در قالب‌های مربوطه ریخته شد.



شکل ۱ کانی تورمالین پگماتیت و تبدیل آن به پودر با روش آسیاب گلوله‌ای

در مرحله بعدی کانی تورمالین که از منطقه بروجرد در استان لرستان تهیه گردیده با روش آسیاب گلوله‌ای به صورت پودر و در اندازه میکرو ذرات درآورده شد که در شکل ۱ تصاویر نمونه مشاهده می‌گردد. سرعت آسیاب گلوله‌ای ۲۲۰ دور در دقیقه و زمان آسیاب گلوله‌ای ۱۵۰ دقیقه می‌باشد. اصلاح تورمالین پگماتیت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت. سپس با استفاده از آهنربا ذرات مغناطیسی موجود در آن‌ها جداسازی کرده و سپس با درصدهای وزنی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ به ترتیب معادل ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم جداگانه در نانوکامپوزیت بهینه یک درصد وزنی نانوذره سیلیکا/اپوکسی به مدت ۳۰ دقیقه به روش مکانیکی در ۳۰۰ دور در دقیقه ترکیب گردید. در مرحله‌ی بعد به منظور جلوگیری از کلوخه شدن میکروذرات تورمالین و همچنین به دست آمدن ترکیبی یکنواخت و همگن، با استفاده از دستگاه آلتراسونیک ساخت کشور آلمان با فرکانس ۵۰ مگاهرتز و دامنه کاوش ۰/۵ به مدت ۶۰ دقیقه همزده شده و سپس مخلوط را به مدت ۲۰ دقیقه داخل دستگاه حمام آلتراسونیک قرار داده تا

⁷ pegmatites

⁸ schists

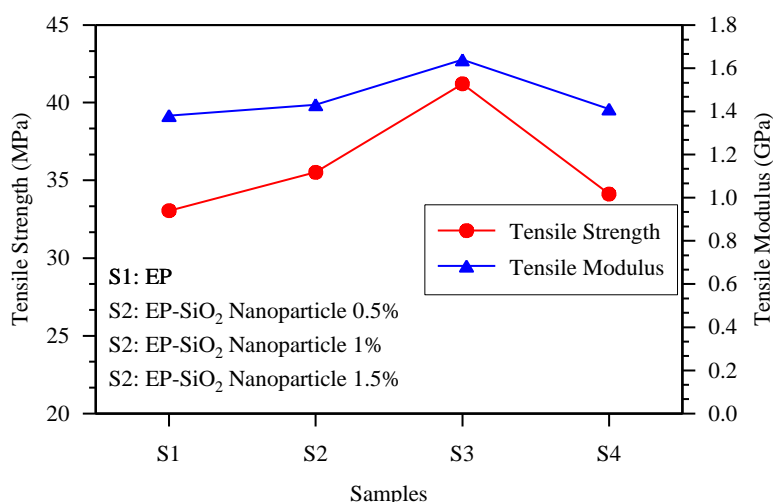
⁹ bisphenol A

¹⁰ ultrasonic

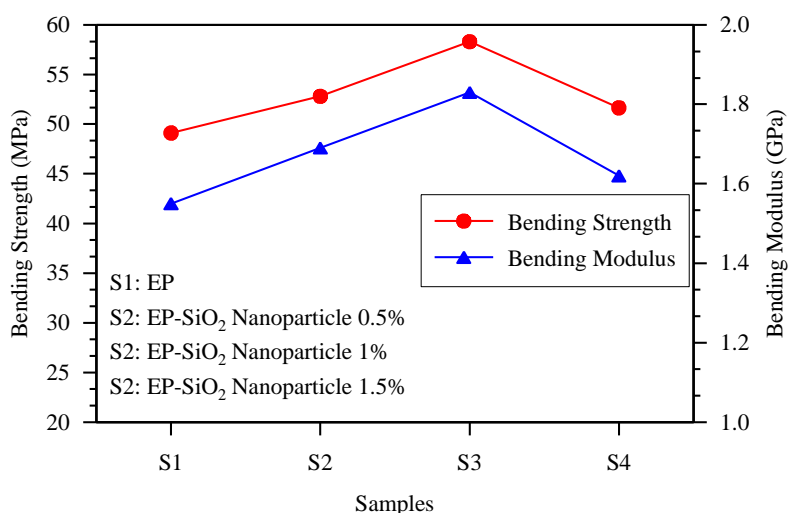
حباب‌های هوا از بین بروند. سپس هاردنر^{۱۱} پلی آمینی را به ترکیب اضافه گردیده و به مدت ۳ دقیقه با همزن مغناطیسی مخلوط کرده و بعد از گاز زدایی در قالب‌های استاندارد کشش و خمش تزریق گردید. تکرارپذیری هر نمونه برای آزمون‌های استحکام کششی و خمشی در این تحقیق سه عدد می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

برای بررسی مقدار بهینه نانوذرات سیلیکا در اپوکسی پلیمری استحکام کششی و خمشی در شکل ۲ و ۳ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد با افزایش نانوذرات سیلیکا تا یک درصد وزنی مدول کششی همچنین استحکام کششی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و سپس با اضافه کردن بیشتر به دلیل کلوخه شدن نمونه‌ها افت محسوسی از استحکام کششی مشاهده گردید. شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در ساختار رزین اپوکسی، ابتدا شاهد افزایش قابل توجهی در استحکام خمشی و مدول خمشی آن هستیم. با این حال، در غلظت ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات، شاهد کاهش مقاومت خمشی رزین اپوکسی خواهیم بود.



شکل ۲ نمودار خواص کششی نانوذرات سیلیکا داخل پلیمر اپوکسی

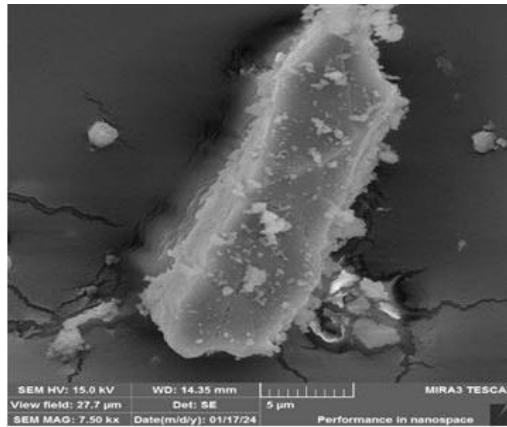


شکل ۳ نمودار خواص خمشی نانوذرات سیلیکا داخل پلیمر اپوکسی

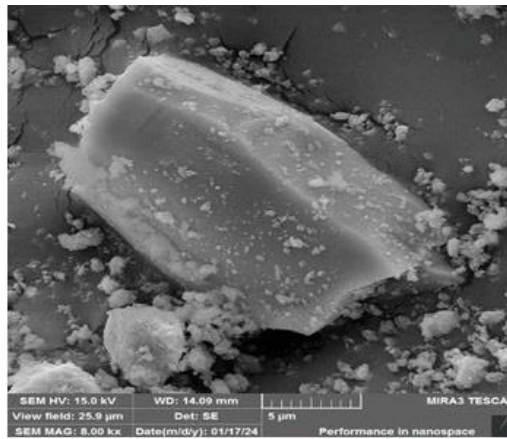
همان‌طور که در شکل ۴-الف تصاویر میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده است میکروذرات کانی تورمالین اصلاح شده به صورت بلورهای بی‌شکل در ابعاد ۲ تا ۸ میکرومتر به صورت ریز تا درشت به رنگ سبز مایل به قهوه‌ای به دست آمد. بر اساس نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) که در شکل ۴-ج ارائه شده است، عناصر تشکیل‌دهنده این کانی شناسایی شده و

¹¹ hardener

ترکیب آن شورل با فرمول $\text{NaFe}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$ تعیین گردید. اصلاح تورمالین پگماتیت در دمای 850°C صورت پذیرفت. یکی از مهم‌ترین دلایل‌های تغییر رنگ در تورمالین اصلاح‌شده تبدیل آهن دو ظرفیتی به آهن سه‌ظرفیتی می‌باشد که تغییر رنگ تورمالین از سیاه به رنگ قهوه‌ای در بلورهای اصلاح‌شده دیده می‌شود.



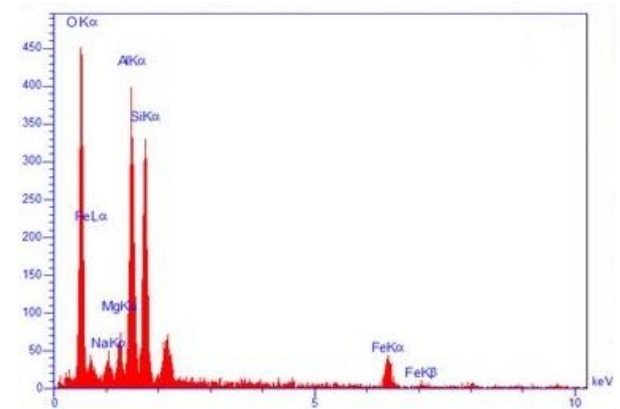
(الف)



(ب)

Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF
B	Ka	۳.۵	۲.۳۰۹۶	۰.۱۸۸۵	۰.۰۵۷۲	۳۷.۲۴	۴۹.۳۴	۰.۱۵۳۶
O	Ka	۱۶۵.۲	۲.۳۰۹۶	۰.۵۰۱۷	۰.۱۵۲۳	۴۸.۷۱	۴۳.۶۱	۰.۳۱۲۶
Na	Ka	۹.۷	۲.۳۰۹۶	۰.۰۰۹۳	۰.۰۰۲۸	۰.۷۲	۰.۴۵	۰.۳۸۸۹
Mg	Ka	۱۸.۴	۲.۳۰۹۶	۰.۰۱۵۷	۰.۰۰۴۸	۰.۸۷	۰.۵۱	۰.۵۴۸۱
Al	Ka	۱۵۹.۸	۲.۳۰۹۶	۰.۱۲۹۹	۰.۰۳۹۴	۶.۰۵	۳.۲۱	۰.۶۵۲۳
Si	Ka	۱۳۶.۵	۲.۳۰۹۶	۰.۱۱۲۸	۰.۰۳۴۲	۴.۸۳	۲.۴۶	۰.۷۰۹۴
Fe	Ka	۱۶.۱	۰.۶۴۸۰	۰.۰۴۲۰	۰.۰۱۲۸	۱.۵۸	۰.۴۱	۰.۸۰۷۱
				۱.۰۰۰۰	۰.۳۰۳۵	۱.۰۰۰۰	۱.۰۰۰۰	

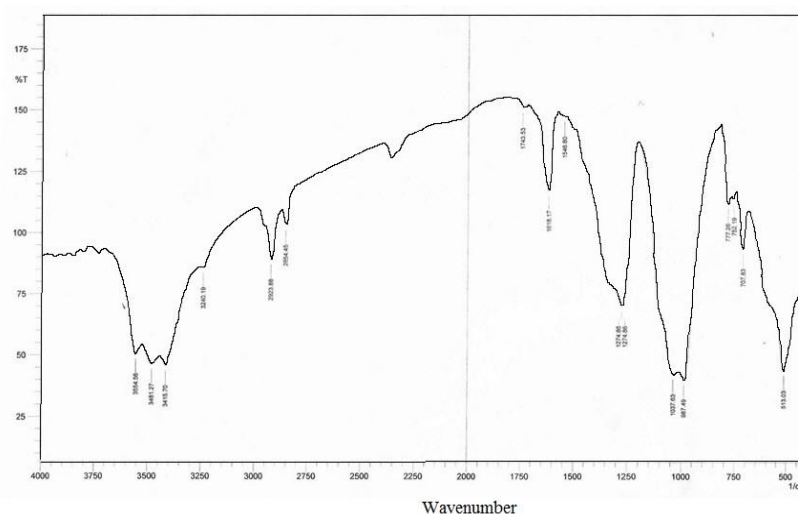
(ج)



شکل ۴ الف، ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی، ج) نتایج EDX تورمالین اصلاح شده

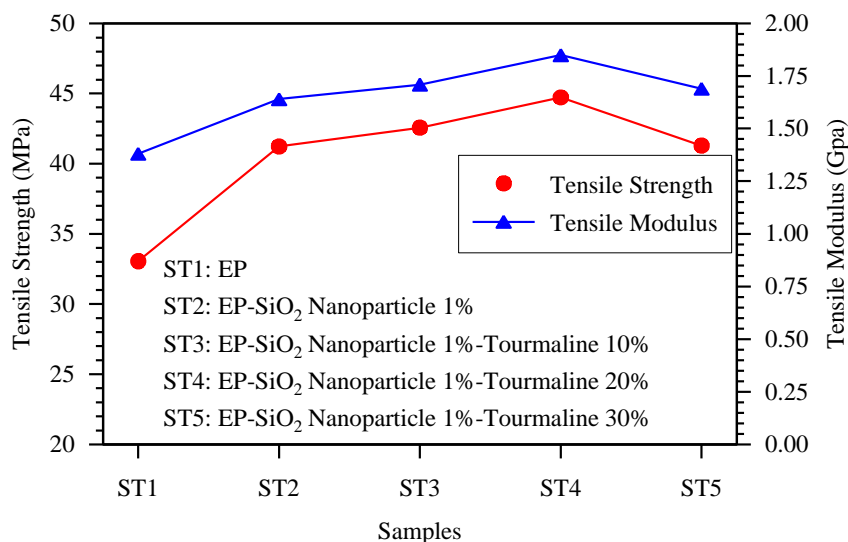
طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز میکروذرات تورمالین اصلاح‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌گردد طیف جذب مادون قرمز به‌وسیله ارتعاش B-O توسط پیوندهای $[\text{BO}_3]$ و ارتعاش پیوند Si-O-Si تشکیل شده توسط $[\text{SiO}_4]$ می‌باشد. پیک‌های جذب در $1618/17 \text{ cm}^{-1}$ ، $1274/86 \text{ cm}^{-1}$ ، $1073/63 \text{ cm}^{-1}$ ، $967/49 \text{ cm}^{-1}$ و

^۱ ۵۱۳/۰۳ برای ارتعاش کششی B-O و پیوند Si-O-Si می‌باشد.

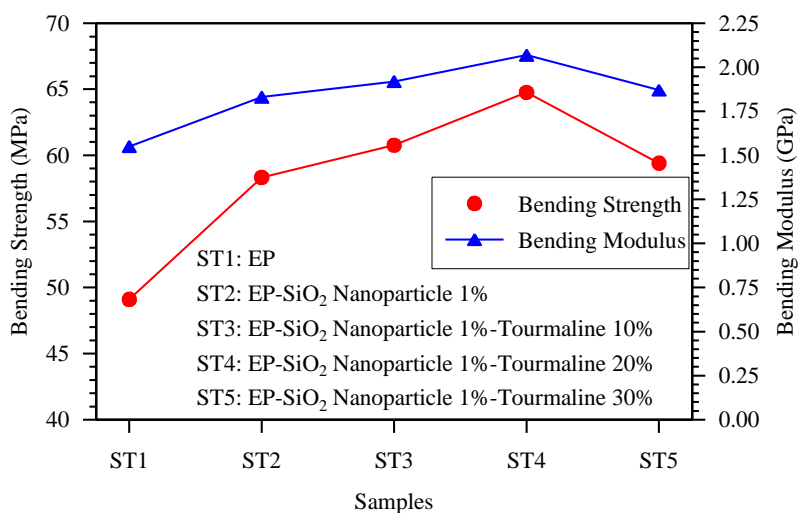


شکل ۵ نتایج FT-IR تورمالین اصلاح شده

در شکل ۶ استحکام و مدول کششی نانوکامپوزیت‌ها حاوی درصد‌های وزنی مختلف میکروذرات تورمالین اصلاح شده با مقدار بهینه نانوسیلیکا/اپوکسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدول کششی نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی ماکزیمم ۱۸٪/۸ و همچنین استحکام کششی آن ۲۴٪/۷ افزایش پیدا کرده بود که با اضافه کردن میکروذرات تورمالین اصلاح شده به نانوکامپوزیت شاهد بهبود خواص مکانیکی شده که با اضافه کردن ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی، استحکام کششی ۲۸٪/۸ و ۳۵٪/۳ افزایش و مدول کششی به ترتیب ۲۴٪/۱ و ۳۳٪/۵ افزایش داشته است. با افزایش درصد وزنی بیشتر میکروذرات تورمالین به نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی به دلیل کلوخه‌ای شدن افت استحکام را به همراه داشت. بررسی آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است، همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است با افزایش میکرو ذرات تورمالین اصلاح شده تا ۲۰ درصد وزنی، خواص خمشی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن باعث کاهش استحکام خمشی خواهد شد. با اضافه کردن ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی میکروذرات تورمالین اصلاح شده به نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی، استحکام خمشی ۱۵٪/۱ و ۲۲٪/۶ افزایش یافته و مدول خمشی به ترتیب ۲۳٪/۸ و ۳۴٪/۳ افزایش داشته است.

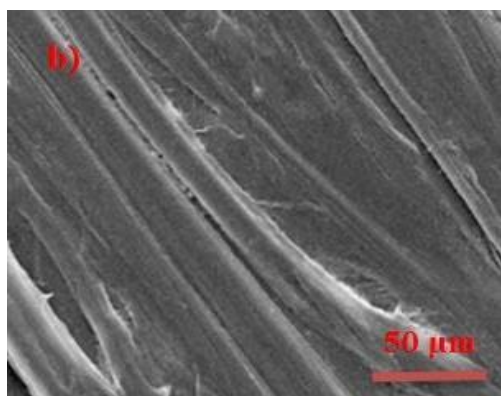


شکل ۶ نمودار خواص کششی نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی/تورمالین اصلاح شده

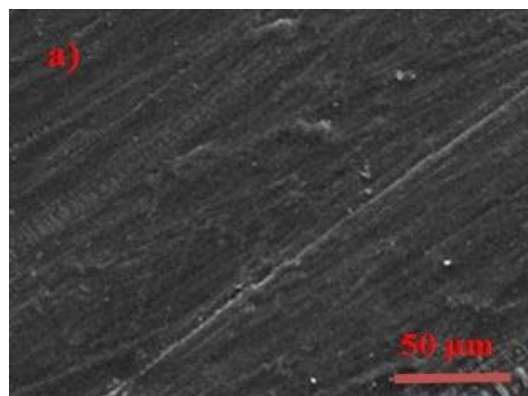


شکل ۷ نمودار خواص خمشی نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی/تورمالین اصلاح شده

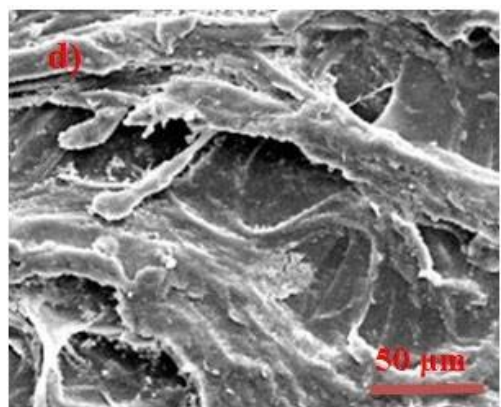
شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست نانوکامپوزیت اپوکسی همراه با یک درصد وزنی نانوسیلیکا (ST1)، نانوکامپوزیت اپوکسی همراه با یک درصد وزنی نانوسیلیکا و ۱۰ درصد وزنی میکروذرات تورمالین اصلاح شده (ST2)، نانوکامپوزیت اپوکسی همراه با یک درصد وزنی نانوسیلیکا و ۲۰ درصد وزنی میکروذرات تورمالین اصلاح شده (ST3) و نانوکامپوزیت اپوکسی همراه با یک درصد وزنی نانوسیلیکا و ۳۰ درصد وزنی میکروذرات تورمالین اصلاح شده (ST4) را نشان می‌دهد.



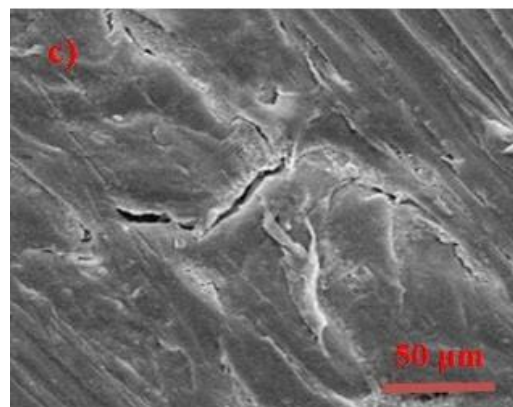
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸ تصاویر SEM برای نمونه‌های الف (ST1، ب (ST2، ج (ST3، د (ST4

تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه با ترکیب ۳۰ درصد وزنی تورمالین اصلاح شده با نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی در شکل ۸-د به خوبی مناطق کلوخه‌ای شدن نانوکامپوزیت مشاهده می‌گردد. در جدول ۱ خواص مکانیکی نمونه‌ها از قبیل استحکام کششی و

خمشی، مدول کششی و خمشی و همچنین مقایسه درصدی آن‌ها نسبت به اپوکسی خالص آورده شده است که نشان‌دهنده کاهش استحکام کششی و خمشی در ۳۰ درصد وزنی تورمالین اصلاح‌شده است که کلوخه‌ای شدن نانوکامپوزیت که در شکل ۸-د قابل مشاهده بود را نشان می‌دهد. بیشترین استحکام کششی و خمشی نیز با اضافه کردن ۲۰ درصد وزنی تورمالین اصلاح‌شده به نانوکامپوزیت بهینه شده به دست آمد.

جدول ۱ خواص مکانیکی نمونه‌ها و مقایسه با پلیمر اپوکسی خالص

ST4		ST3		ST2		ST1		
%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	
۲۴/۹	۴۱/۲۸	۳۵/۳	۴۴/۷۲	۲۸/۸	۴۲/۵۶	۲۴/۷	۴۱/۲۲	استحکام کششی
۲۲/۵	۱۶۹۱	۳۳/۵	۱۸۵۷	۲۴/۱	۱۷۱۳	۱۸/۸	۱۶۴۰	مدول کششی
۱۲/۵	۵۹/۴۰	۲۲/۶	۶۴/۷۶	۱۵/۱	۶۰/۷۶	۱۰/۴	۵۸/۳۲	استحکام خمشی
۲۰/۷	۱۸۷۲	۳۴	۲۰۷۷	۲۳/۸	۱۹۲۰	۱۸/۲	۱۸۳۲	مدول خمشی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص مکانیکی میکروذرات تورمالین اصلاح شده بر روی نانوکامپوزیت سیلیکا/اپوکسی با درصد‌های وزنی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی تورمالین اصلاح شده، استحکام کششی و خمشی نانوکامپوزیت افزایش یافت. به‌عنوان مثال، نتایج نشان داد که با افزایش ۲۰ درصدوزنی میکروذرات تورمالین اصلاح شده همراه با یک درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در پلیمر اپوکسی، بیشترین استحکام کششی و خمشی را دارا بود. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مناسب درصد وزنی تورمالین اصلاح شده و نانوذرات سیلیکا برای بهبود خواص مکانیکی اپوکسی/سیلیکا است. این مطالعه می‌تواند به توسعه مصارف صنعتی این نانوکامپوزیت کمک کند.

Authorship Contribution Statement

Dr. Hamid Mozafari



Biography: Hamid Mozafari received his Ph.D. in mechanical engineering from the Technical University of Malaysia in 2012. He now serves as an assistant professor in the mechanical engineering department at Payame Noor University in Tehran. His research is currently centered on the development and utilization of nanocomposite materials.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Hadi Yeganehfar



Biography: Hadi Yeganehfar received his Ph.D. in geology from Tarbiat Modares University in 2013. Presently, he serves as an assistant professor in the Department of Basic Sciences at Payame Noor University in Tehran. He has focused his research on crustal involvement and ore potential in Jurassic plutonic rocks and tourmaline minerals

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

۵- مراجع

[1] Mansouri E, Hooshangi H, Salehi M. Investigation of the effect of turbulent friction process parameters on the surface mechanical properties of AZ31B/CNT nanocomposite using Sobel sensitivity analysis. *Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal*. 2022; 2(1):108–122.

[2] Heydari F, Khalaj R. Water softening by a Polymeric Membrane Containing GO and FeOOH Nanoparticles. *Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal*. 2023;2(4):393–400.

- [3] Gohari M, Tahmasebi M, Pak A, Farhadi A. Fabrication a Nano Magnetic Slime and Its Applications. *Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal*. 2023; 3(3):398–412.
- [4] Sharma R, Sharma DK, Agarwal R, Rinawa ML, Subbiah R, Kumar PM. Investigating the effect of nanoclay content on the mechanical characteristics of natural fiber epoxy composite. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 66:1319-23.
- [5] Kumar GB, Kumar PV, Kumar S, Datta VV, Sai RH. Epoxy matrix polymer composites with metal particle reinforcements. In *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing. 2021;1:2408.
- [6] Ouchte I, Chafiq J, El Fqih MA, Chakir H. Effect of thermal treatment on mechanical properties and thermogravimetric analysis of laminate composite jute/epoxy. *Materials Today: Proceedings*. 2022;66:135-9.
- [7] Mahmud MA, Abir N, Anannya FR, Khan AN, Rahman AM, Jamine N. Coir fiber as thermal insulator and its performance as reinforcing material in biocomposite production. *Heliyon*. 2023;9(5):15597.
- [8] Kim T, Kwon S, Kim H, Lim C, chung I, Lee W. Effect of the Surface Modification of Silica Nanoparticles on the Viscosity and Mechanical Properties of Silica/Epoxy Nanocomposites. *Composites interfaces*. 2022;29:1573-90.
- [9] Gokuldass R, Ramesh R. Mechanical strength behavior of hybrid composites tailored by glass/Kevlar fibre-reinforced in nano-silica and micro-rubber blended epoxy. *Silicon* 2019;11: 2731–39.
- [10] Singh S, Kumar A, Jain A. Improving tensile and flexural properties of SiO₂-epoxy polymer nanocomposite. *Materialstoday*. 2018;5:6339–44.
- [11] Siraj S, Al-Marzouqi A, Iqbal M, Ahmed W. Impact of Micro Silica Filler Particle Size on Mechanical Properties of Polymeric Based Composite Material. *Polymers*. 2022;14:4830.
- [12] Kbhwardwaja S, Rao T. Investigation of tensile and flexural behavior of epoxy and SiO₂ composite. An experimental study *Materials Today: Proceedings*. 2021; 45:2649–52.
- [13] Wenli S, Zhidan Z, Xuanxue M, Guochen D, Xiaowei L. Tourmaline as an indicator for pegmatite evolution and exploration: A case study from the Chakabeishan deposit, northeastern Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*. 2024;165:105892.
- [14] Yafeng L, Xuejiao T, Qing Z. A review: Application of tourmaline in environmental fields. *Chemosphere*. 2021;281:130780.
- [15] Naichuan Y, Junxue B, Hanfei C, Hao Y, Rongmei S. Electrocatalysis coupled heterogeneous electro-Fenton like treatment of coal gasification wastewater using tourmaline as catalyst: process parameters and response surface. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31:1–15.
- [16] Tian Y, Jiawei W, Nengjie D, Xin G, Meicheng W. Tourmaline for heavy metals removal in wastewater treatment: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2024;131:44–53.
- [17] Liu J, Qin Y, Yuan S, Gao P, Nie Q. Investigation on the mechanism of water activated via tourmaline powder. *Journal of Molecular Liquids*. 2021; 332:115854.
- [18] Mirsephond, F, Tahmasabi Z, Shahrokhi, S, Ahmadi A, Khalili, M. Geochemistry and determining the origin of tourmalines in Borujerd region. *Crystallography and Mineralogy of Iran*. 2011;20:281-92.