



بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی افزودنی‌ها بر خواص فیزیکی، مکانیکی و ساختاری نانوکامپوزیت SiC-TiB₂ تقویت شده با نانوذرات نقاط کوانتومی گرافن (GQD)

لاله خیری نیا¹، نادر پروین^{2*}، حمیدرضا بهاروندی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استاد، مرکز مواد و تکنولوژی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-4413، nparvin@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1404/10/18

پذیرش: 1405/03/17

کلیدواژگان

کاربید سیلیسیم،

دی بورید تیتانیم،

نقاط کوانتومی گرافن،

خواص فیزیکی و مکانیکی

چکیده

این پژوهش به تولید کامپوزیت زمینه کاربید سیلیسیم می‌پردازد و تأثیر افزودنی‌های دی بورید تیتانیم و نقاط کوانتومی گرافن (GQD) برای افزایش ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و ساختاری را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف از این پژوهش، تولید کامپوزیت SiC-TiB₂-GQD با خواص فیزیکی و مکانیکی بالا همچون چقرمگی شکست و مدول ینگ بالاتر نسبت به کاربید سیلیسیم خالص می‌باشد. طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی انجام شد و نهایتاً 23 عدد نمونه با ترکیب شیمیایی متفاوت تهیه شد و قطعات نهایی بعد از عملیات پرس هیدرولیک به شکل قرص تولید شدند. نمونه‌های تولید شده با مقادیر مختلف از افزودنی‌ها و نیز مقدار متناسب از پودر زمینه‌ی کاربید سیلیسیم تهیه و تحت عملیات سینتر در دمای 2150 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. با بررسی‌های ریزساختاری، شکست‌نگاری، خواص مکانیکی و فیزیکی شرایط بهینه برای تولید این کامپوزیت‌ها تعیین شد. نهایتاً بالاترین میزان چقرمگی شکست (6.13 MPa.m^{1/2}) و مدول ینگ (523 MPa) برای نمونه‌ی حاوی 20 درصد وزنی TiB₂ و 0.3 درصد وزنی GQD حاصل شد.

Investigation the effect of chemical composition of additives on physical, mechanical and structural properties of SiC-TiB₂ nanocomposites reinforced by Graphene Quantum Dot nanoparticles (GQD)

Laleh Kheyrinia¹, Nader Parvin^{1*}, Hamid Reza Baharvandi²

1- Department of Material Engineering, Amirkabir University and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Material Engineering, Malek-e-Ashtar University, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, nparvin@aut.ac.ir.

Keywords

SiC,
TiB₂,
GQD,
Mechanical and physical properties.

Abstract

This research focuses on the production of silicon carbide matrix composites and investigates the addition of titanium diboride and graphene quantum dots (GQD) to enhance mechanical, physical, and structural properties. The aim of this research is to produce SiC-TiB₂-GQD composites with high physical and mechanical properties such as fracture toughness and Young's modulus higher than pure silicon carbide. The experimental design was carried out using the Taguchi method and finally 23 samples with different chemical compositions were prepared and the final samples were produced in the form of tablets after hydraulic pressing. The samples produced with different amounts of additives and also the appropriate amount of silicon carbide matrix powder were prepared and subjected to sintering at 2150°C. By examining microstructure, fractography, mechanical and physical properties, the optimal conditions for producing these composites were determined. Finally, the highest fracture toughness (6.13MPa.m^{1/2}) and Young's modulus (523MPa) were obtained for the sample containing 20 wt% TiB₂ and 0.3 wt% GQD.

1- مقدمه

گزینه‌ها برای کاربرد مواد در دمای بالا می‌باشد. البته این حجم بالا از پیوند کوالانسی نیز دلیلی برای سینتر پذیری نامناسب یا بسیار سخت این ماده به طور خالص می‌باشد. SiC سرامیکی مهندسی است که با ایجاد پیوند کوالانسی میان اتم‌های سیلیسیم (Si) و کربن (C) تشکیل شده است [1-3]. SiC تنها

کاربید سیلیسیم به طور طبیعی کمیاب است. این ماده به طور اتفاقی توسط برزیلیوس کشف شد، سپس به روش اچسون در کوره ذوب الکتریکی تولید شد. SiC دارای 88 درصد پیوند کوالانسی می‌باشد که به همین دلیل یکی از بهترین

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Kheyrinia, L., Parvin, N., Baharvandi, H.R., "Investigation the effect of chemical composition of additives on physical, mechanical and structural properties of SiC-TiB₂ nanocomposites reinforced by Graphene Quantum Dot nanoparticles (GQD)," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 4, pp. 2873-2880, 2026. <https://doi.org/10.22068/jstc.2026.2083517.1950>

ترکیب پایدار در سیستم دوتایی C-Si می‌باشد. در SiC ، 75.05 درصد سیلیسیم و 24.95 درصد کربن وجود دارد. SiC نقطه ذوب متجانس ندارد، اما داخل گرافیت و یک مذاب غنی از سیلیسیم در سیستم بسته تحت فشار اتمسفر در 2830°C به صورت پری‌تکتیک تجزیه می‌شود. نمودار فازی SiC در شکل 1 نشان داده شده است.

برای استفاده‌ی بهینه از SiC لازم است این سرامیک خواصی همچون سختی و استحکام بالا را در کنار چقرمگی شکست بالا داشته باشد. به طور کلی کاربرد سیلیسیم ماده‌ای با قابلیت سینتر پایین می‌باشد. علت این موضوع وجود پیوند کوالانسی قوی بین Si و C و ضریب نفوذ در خود پایین آن می‌باشد. این موضوع باعث شده است که از روش‌های همراه با فشار جهت کمک به فرآیند سینتر استفاده شود. از جمله مهم‌ترین روش‌های سینتر همراه با فشار، روش پرس گرم^۲، پرس ایزواستاتیک گرم^۳ و سینتر جرقه پلازما^۴ می‌باشد [10-13]. علاوه بر روش سینتر همراه با فشار، روش دیگری که بسیار مورد توجه صنایع می‌باشد، سینتر بدون فشار^۵ است. PLS در دو حالت سینتر حالت مایع و سینتر حالت جامد استفاده می‌شود. با توجه به توانمندی روش سینتر بدون فشار در امکان فراهم‌آوری هم‌زمان دما، زمان و سیکل حرارتی مناسب و همچنین حذف فشار اعمالی خارجی در حین پخت نمونه‌ها، برای چگال کردن کامپوزیت‌های مذکور از روش سینتر بدون فشار استفاده شد [14,15]. در سینتر بدون فشار حالت جامد، افزودنی‌ها باعث کاهش انرژی سطحی دانه‌ها و بهبود عملیات سینتر می‌شوند، بنابراین اگر هدف رسیدن به خواص مکانیکی بالا باشد باید از سینتر فاز جامد کمک گرفت [16]. قطعات تولیدی از این روش دارای دانه‌های ریز هم‌محور (اندازه دانه بین 1 تا $4\ \mu\text{m}$)، مقاومت در برابر خزش دمای بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون هستند. کاربرد سیلیسیم در حالت بدون افزودنی دارای چقرمگی شکست نسبتاً پایینی می‌باشد اما افزودن دی‌بورید تیتانیم مقدار چقرمگی شکست کامپوزیت را تا بیش از 30 درصد افزایش می‌دهد و به طور هم‌زمان باعث بهبود خواص الکتریکی کامپوزیت نیز خواهد شد [17-20]. افزودن نقاط کوانتومی گرافن به کامپوزیت $\text{SiC}-\text{TiB}_2$ به عنوان مانعی در برابر رشد بیش از حد دانه‌ها عمل کرده و به عبارتی مرز دانه‌ها را قفل می‌کند و خواص مکانیکی کامپوزیت را ارتقاء می‌دهد [21-24].

هدف از این پژوهش تولید کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی دما بالای پایه کاربرد سیلیسیم می‌باشد و امکان استفاده هم‌زمان افزودنی‌های دی‌بورید تیتانیم و نقاط کوانتومی گرافن (GQD) را در راستای افزایش ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مورد بررسی قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر برای دستیابی به این مهم، نمونه‌ها با مقادیر مختلف از افزودنی‌ها و نیز مقدار متناسب از پودر زمینه‌ی کاربرد سیلیسیم تهیه و تحت عملیات سینتر در دمای 2150°C قرار گرفتند. در ادامه با بررسی‌های ریزساختاری، شکست‌نگاری، خواص مکانیکی و فیزیکی، سعی شد تا شرایط بهینه برای تولید این کامپوزیت‌ها تعیین شود.

2- بخش تجربی

مواد اولیه مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است. پودر کاربرد سیلیسیم مورد استفاده در این پژوهش با خلوص 99.9% و ساخت شرکت Merck می‌باشد. همچنین الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) در شکل 2 نشان داده شده است. به منظور آنالیز فازی مواد خام و سینتر شده از دستگاه پراش اشعه ایکس ساخت شرکت فیلیپس استفاده شد. الگوی پراش اشعه X قطعات در

مطابق شکل 1، SiC تقریباً یک ترکیب خطی (Line Compound) است و انحراف ترکیبی زیادی را تحمل نمی‌کند. این موضوع برای طراحی درصد GQD و TiB_2 حائز اهمیت است. نواحی فازی مهم در نمودار به دو صورت است: سمت سیلیسیم‌دار ($\text{Si}+\text{SiC}$)، به این صورت که اگر کمبود کربن وجود داشته باشد فاز Si آزاد تشکیل می‌شود و سمت کربن‌دار ($\text{C}+\text{SiC}$)، یعنی اگر کربن اضافی باشد گرافیت آزاد باقی می‌ماند. در پژوهش حاضر، دمای سینتر 2150 درجه سانتی‌گراد تعیین شده است که کمتر از دمای 2830°C درجه سانتی‌گراد می‌باشد این یعنی SiC تجزیه کامل نمی‌شود اما نفوذ سطحی فعال است، واکنش‌های مرزی می‌تواند رخ دهد و اگر ترکیب دقیق نباشد فازهای ثانویه می‌تواند تشکیل شود. با افزودن نقاط کوانتومی گرافن (کربن فعال با سطح ویژه بالا)، اگر نسبت کربن از 50 درصد اتمی بیش‌تر شود وارد ناحیه‌ی $\text{C}+\text{SiC}$ می‌شود و گرافیت آزاد باقی می‌ماند و این همان چیزی است که می‌تواند باعث افزایش چقرمگی (crack deflection) شود. مطابق شکل، کاربرد سیلیسیم در دمای سینتر یعنی 2150 درجه سانتی‌گراد کاملاً پایدار است و سیستم در این دما در ناحیه‌ی جامد است [4].

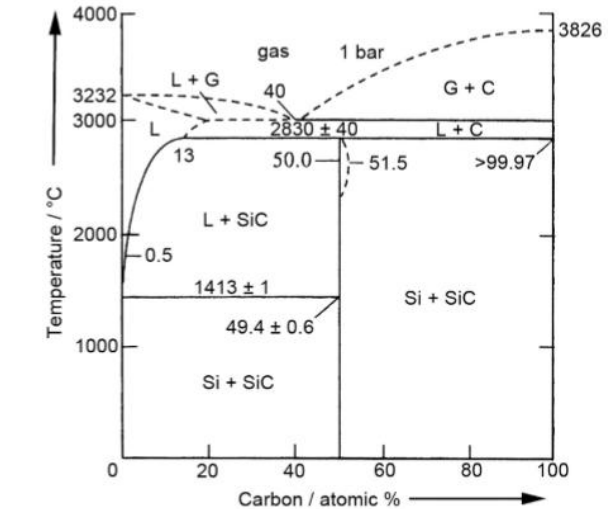


Fig. 1 Silicon carbide phase diagram [3]

شکل 1 نمودار فازی کاربرد سیلیسیم [3]

کاربرد سیلیسیم دارای بیش از 200 دگرشکل^۱ مختلف می‌باشد. معروف-ترین دگرشکل‌های SiC شامل 3C، 6H، 4H، 2H و 15R می‌باشند که دارای ساختارهای مختلفی هستند. به طور مثال 3C دارای تقارن مکعبی است که لایه‌های آن به صورت ABCAB... قرار گرفته‌اند. در 6H لایه‌ها به صورت ABCACB قرار گرفته‌اند که این ترتیب در لایه‌های بعدی تکرار شده است. 3C تنها دگرشکل مکعبی SiC است که تحت عنوان $\beta\text{-SiC}$ شناخته می‌شود. تقارن‌ها و ترتیب‌های مختلف چیده شدن دیگری نیز در این سرامیک قابل مشاهده است. بیشتر دگرشکل‌های SiC دارای تقارن هگزگونال می‌باشند که

³Hot Isostatic Press (HIP)

⁴Spark Plasma Sintering (SPS)

⁵Pressureless Sintring (PLS)

¹Politype

²Hot press (HP)

شد اما با این تفاوت که در ادامه دستخوش تغییراتی شد. با توجه به محدود بودن مقالات و پژوهش‌های منتشر شده مشابه با این ترکیب، و از طرفی نوآوری که در استفاده از GQD به همراه SiC و TiB₂ وجود دارد، تصمیم بر این شد که یک آزمایش تأییدی روی ترکیب نزدیک به بهینه انجام شود و با کم و زیاد کردن مقدار GQD و TiB₂ مقدار بهینه و دقیق افزودنی‌ها برای این نوع کامپوزیت به دست آید. چون مقادیر کمتر و حتی زیر 0.5 درصد GQD نیز اثرات قابل توجهی دارد. در ادامه با ریز تر شدن روی مقادیر افزودنی‌ها تعداد 23 ترکیب انتخاب شد. طبق طراحی آزمایش انجام شده، برای بهینه‌سازی میزان مواد اولیه مورد استفاده در ترکیب کامپوزیت، 23 ترکیب مورد نیاز بود و برای جلوگیری از توقف آزمایش به دلیل احتمال منهدم شدن بخشی از پودرها و قطعات، و نیز در نظر گرفتن این احتمال که در حین فرآیند پخت و سینتر نمونه‌ها و نیز حین فرآیند پرس ممکن است نمونه‌ای دچار آسیب شود، برای هر ترکیب 3 نمونه مجزا تولید شد و در مجموع 69 عدد نمونه کامپوزیتی به صورت قرص‌های با قطر 16 و ارتفاع 8 میلی‌متر تولید شدند. به منظور حذف مواد فرار موجود، همه‌ی نمونه‌ها تا دمای 600°C و با نرخ حرارت-دهی 600 °C/min پیرولیز شدند. در ادامه عملیات سینتر در دمای 2150°C با نرخ حرارت دهی 10 °C/min در اتمسفر آرگون انجام شد. عملیات سینتر نمونه‌ها در کوره با اتمسفر آرگون با خلأ 3-10 داخل بوتله‌های گرافیتی و در دمای 2150°C انجام شد. میانگین سرعت سرد شدن نمونه‌ها حدود 5°C/min بود. در بخش نخست پژوهش، آثار افزودنی‌های TiB₂ و نقاط کوانتومی گرافن، با انتخاب نسبت استوکیومتری مناسب و کسر حجمی فازهای تقویت کننده و همچنین دمای فرآیند سینتر بدون فشار بررسی و بهینه‌سازی شد تا نتایج به دست آمده، برای ادامه روند آزمایش به کار گرفته شوند. ابتدا درصد‌های مشخصی از افزودنی TiB₂ در محدوده‌ی 2.5-25 درصد وزنی، SiC در محدوده‌ی 75-97.5 درصد وزنی، با احتساب اینکه مجموع درصد وزنی‌های ماده‌ی زمینه و افزودنی برابر با 100 درصد وزنی شود، افزوده می‌شود. در ادامه بعد از بهینه‌سازی میزان پودر اولیه و افزودنی پوریدی، مقدار نقاط کوانتومی گرافن برای ارزیابی دقیق مناسب‌ترین میزان نقاط کوانتومی گرافن در زمینه‌ی کامپوزیت SiC-TiB₂ در محدوده‌ی 0-2 درصد وزنی اضافه شد تا میزان بهینه‌ی مواد اولیه با توجه کم بودن پژوهش‌های انجام شده در این زمینه و در دسترس نبودن داده‌های کافی، از طریق به کارگیری بازه‌های مناسب برای کسر وزنی تقویت کننده‌ها به دست آید.

مراحل تحقیق در شکل 3 آورده شده است. ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 gr را دارد. توزین پودرها از آن استفاده شد ساخت شرکت سارتوریوس¹ مدل BL1500S بود که دقت توزین تا 0.01 gr را دارد.

جدول 2 متغیرها و سطوح تغییر آزمایش در دمای سینتر در 2150°C

Table 2 Variables and levels of test change at sintering temperature at 2150°C

متغیر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
درصد وزنی SiC	100-total wt%	100-total wt%	100-total wt%
درصد وزنی TiB ₂	25-30wt%	20-25wt%	2/5-20wt%
درصد وزنی GQD	0-2wt%	0-2wt%	0-2wt%
*Total: مجموع درصد وزنی TiB ₂ و درصد وزنی GQD			

بازه 10-90 درجه با پرتو Cu-Kα، فیلتر نیکل و با ولتاژ شتاب‌دهنده 40 Kv به دست آمد.

جدول 1 مواد اولیه‌ی مورد استفاده

Table 1 Raw Materials

عملکرد	اندازه ذرات	مواد اولیه
زمینه	0.3 μm	SiC
افزودنی	1 μm	TiB ₂
افزودنی	3-5nm	GQD

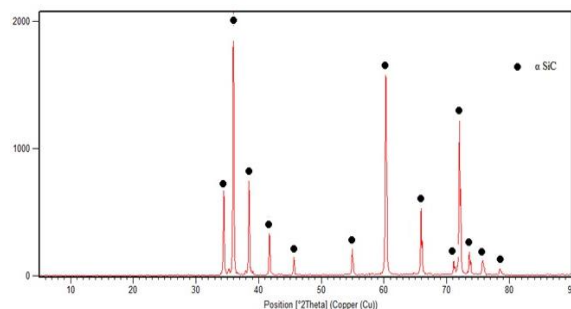


Fig. 2 X-ray diffraction pattern of silicon carbide powder

شکل 2 الگوی پراش اشعه ایکس پودر کاربید سیلیسیم

در شکل 2 فاز α-SiC که شامل دگرشکل‌های (00-022-111R(01-) و 15R(00-039-1196)، 4H(00-029-1127)، 6H(1273-089-4744 است مشاهده می‌شود.

ابتدا پودرهای کاربید سیلیسیم، دی بورید تیتانیوم و نقاط کوانتومی گرافن با نسبت‌های استوکیومتری مشخص توزین شدند و اختلاط پودرها به وسیله‌ی آسیای سیاره‌ای انجام شد و پودرها با نسبت گلوله به پودر 10 به 1 در محیط اتانول با گلوله‌هایی از جنس کاربید تنگستن مخلوط شدند. آسیاب به مدت 2 ساعت و با سرعت 200 دور بر دقیقه انجام شد و سپس کاپ‌ها درون آون با دمای 150°C به مدت 30 دقیقه قرار داده شدند. در ادامه بعد از خروج اتانول، پودر مختلط شده از کاپ خارج شده و بر روی فویل نازک آلومینیومی پهن شدند تا مواد فرار و رطوبت باقی مانده تحت دمای محیط خارج گردد. بعد از تکمیل فرآیند خشک شدن، پودرهای مواد اولیه از طریق عبور از الک 60 مش گرانوله شدند و پودر کامپوزیتی یکنواخت اولیه آماده گردید. در ادامه، پودرهای ترکیب شده تحت فرآیند پرس هیدرولیک قرار گرفتند، پودرها داخل قالب به قطر 1.6cm ریخته شدند و با فشار اولیه 80bar و فشار اعمالی 305MPa در مدت زمان 10s پرس شدند و در نهایت قرص‌هایی به ابعاد 8×16mm تولید شد. طراحی آزمایش اولیه به استفاده از روش تاگوجی انجام شد، به این صورت که دو فاکتور شامل ترکیب GQD و ترکیب TiB₂ و هر کدام شامل 5 سطح در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از آرایه‌ی (5²) L9 تعیین شد که نشان می‌دهد تعداد 25 آزمایش و ترکیب متفاوت کافی باید باشد. چون کاربید سیلیسیم به عنوان ماتریس در این کامپوزیت استفاده شد و دمای سینترینگ هم 2150 درجه سانتی‌گراد و ثابت بوده است فاکتورهای اصلی درصد GQD و درصد TiB₂ بودند و SiC دیگر فاکتور نیست و باقی مانده درصد را تشکیل می‌دهد، در واقع SiC=100-(GQD+TiB₂). نکته مهمی که وجود داشت این بود که در طراحی آزمایش مقادیر حدودی تعیین

برای انجام عملیات سینتر از کوره‌ی گرافیتی مدل CV-15-2400 استفاده شد. این کوره قابلیت کار تا دمای 2300°C در اتمسفر آرگون را دارد. عملیات سینتر در دمای 2150°C با نرخ حرارت دهی $10^\circ\text{C}/\text{min}$ در اتمسفر آرگون انجام شد. عملیات سینتر نمونه‌ها در کوره با اتمسفر آرگون با خلأ 3-10 داخل بوتله‌های گرافیتی و در دمای 2150°C درجه سانتی‌گراد انجام شد. میانگین سرعت سرد شدن نمونه‌ها حدود $5^\circ\text{C}/\text{min}$ بود. در جدول 4 مشخصات کوره سینتر نمونه‌ها را گردآوری شده است.

جدول 4 مشخصات کوره سینتر نمونه‌ها

Table 4 Sintering furnace specifications for samples

مدل	CV-15-2400
اتمسفر	Ar
نرخ حرارت‌دهی	$80^\circ\text{C}/\text{min}$
سرعت سرد شدن	$5^\circ\text{C}/\text{min}$
پیشینه دما	2300°C
دمای کاری	2150°C
زمان	3h

3- نتایج و بحث

3-1- آنالیز FTIR

برای شناسایی ترکیبات آلی حاوی نانوذرات GQD، تعیین نوع گروه عاملی و پیوند موجود در مولکول‌های آن از آنالیز FTIR مدل NICOLET is10 استفاده شد.

آنالیز FTIR پیوند شیمیایی سطح/ میان‌فازی را رصد می‌کند، چیزی که SEM، TEM و AFM به تنهایی نمی‌تواند به علاوه، نقش GQD را از نظر فعال‌سازی سطح و ایجاد پل‌های شیمیایی بین فازها روشن می‌کند. بنابراین برای تعیین ساختار مولکول‌ها به کمک جذب اشعه IR و شناسایی ترکیبات آلی حاوی نانوذرات، تعیین گروه‌های عاملی و پیوند موجود در مولکول‌های آن آنالیز FTIR انجام شد و نتایج حاصل از آن برای نمونه‌ی حاوی 20 درصد وزنی دی بورید تیتانیوم در شکل 4 نشان داده شده است.

محور X (Wavenumber, cm^{-1}) از 400 تا 40000 است و محور Y نیز Absorbance. چند پیک با عدد روی طیف مشخص شده‌اند که شامل پیک‌های 1396، 677، 729، 869، 1396 می‌باشند.

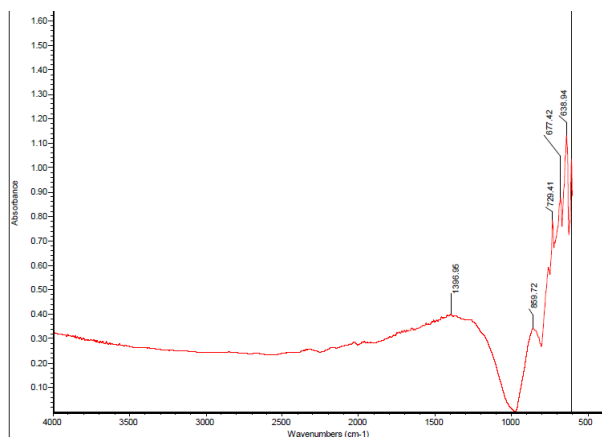


Fig. 4 FTIR analysis for the sample containing $\text{SiC}=79.7\text{wt}\%$, $\text{TiB}_2=20\text{wt}\%$, $\text{GQD}=0.3\text{wt}\%$

شکل 4 آنالیز FTIR برای نمونه $\text{SiC}=79.7\text{wt}\%$ ، $\text{TiB}_2=20\text{wt}\%$ ، $\text{GQD}=0.3\text{wt}\%$

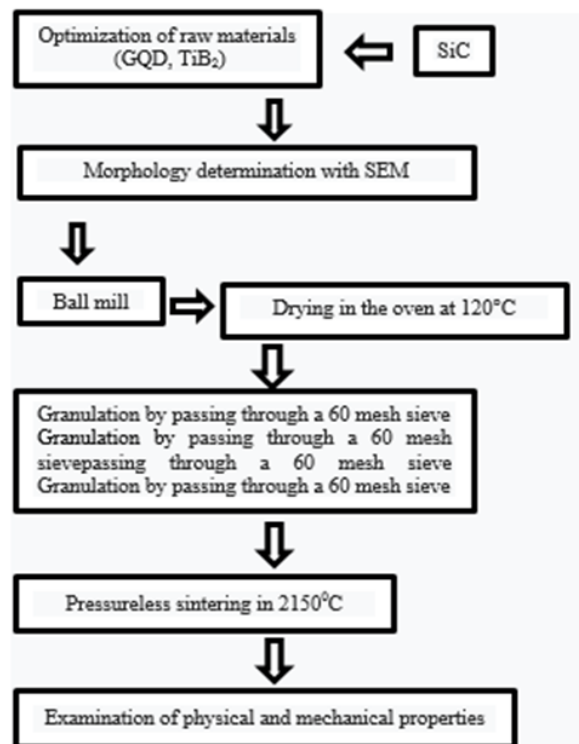


Fig. 3 Research steps (including optimization of raw materials, image analysis, and analysis of analysis results)

شکل 3 مراحل تحقیق (شامل بهینه‌سازی مواد اولیه، آنالیزهای تصویری و تحلیل نتایج حاصل از آنالیزها)

ترکیب نمونه‌های تهیه شده، در جدول 3 ارائه شده است. نمونه‌ها با کدهای مختلف دارای ترکیب شیمیایی‌های متفاوت می‌باشند و همانطور که بیان شد، در نهایت 23 ترکیب نمونه تولید شد.

جدول 3 ترکیب نمونه‌های خام تهیه شده

Table 3 Composition of prepared raw samples

نمونه‌ها	GQDs (wt%)	TiB_2 (wt%)	SiC (wt%)
1A	0	20	80
2A	0/3	2/5	97/2
3A	0/3	5	94/7
4A	0/3	7/5	92/2
5A	0/3	10	89/7
6A	0/3	12/5	87/2
7A	0/3	15	84/7
8A	0/3	17/5	82/2
9A	0/3	20	79/7
10A	0/3	22/5	77/2
11A	0/3	25	74/7
1B	0/1	20	79/9
2B	0/2	20	79/8
3B	0/3	20	79/7
4B	0/4	20	79/6
5B	0/5	20	79/5
6B	0/6	20	79/4
7B	0/7	20	79/3
8B	0/8	20	79/2
9B	0/9	20	79/1
10B	1	20	79
11B	1/5	20	78/5
12B	2	20	78

می‌دهد. ارتفاع سطح (محور Z) در بازه‌ی 0-150 نانومتر است این مقدار برای کامپوزیت نسبتاً زیاد محسوب می‌شود و نشان می‌دهد که ذرات SiC و TiB₂ به طور کامل هم‌سطح نشده‌اند و حضور GQD باعث ایجاد ناهمواری موضعی در این نمونه شده است. قله‌های بلند احتمالاً مربوط به ذرات برجسته‌ی TiB₂ هستند و نواحی هموارتر مربوط به ماتریس SiC. وجود نقاط کوانتومی گرافن می‌تواند زبری سطح را کمی افزایش دهد چون به صورت نانو صفحه روی سطح می‌نشینند. نتیجه کلی از آنالیز AFM با توجه به تحلیل‌های ذکر شده به این صورت است که سطح کامپوزیت دارای زبری قابل توجه می‌باشد، قله‌های تیز احتمالاً مربوط به تجمع TiB₂ یا نقاطی از GQD هستند. این مورفولوژی می‌تواند به بهبود چسبندگی بین فازها و همچنین افزایش سطح تماس در کامپوزیت کمک کند، ولی اگر تجمع شدید باشد منجر به کاهش خواص مکانیکی می‌شود.

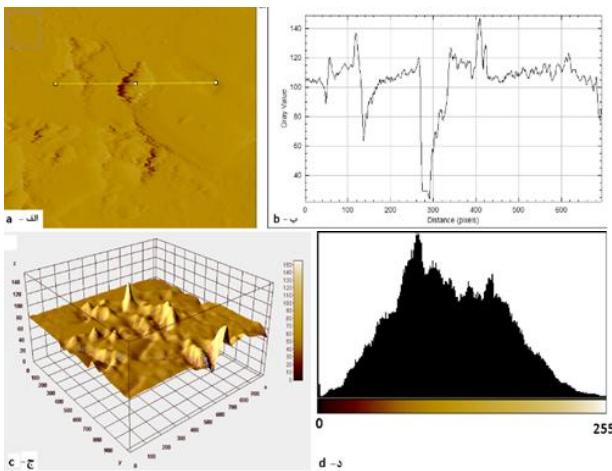


Fig. 5 AFM image of the sample with 20 wt% TiB₂: a) two-dimensional image of the surface topography (Topography), b) line profile (Line scan data), c) three-dimensional image (3D AFM), and d) histogram image of the sample

شکل 5 تصویر AFM نمونه با 20 درصد وزنی TiB₂: الف) تصویر دو بعدی توپوگرافی سطح (Topography)، ب) پروفایل خطی (Line scan data)، ج) تصویر سه بعدی (3D AFM) و د) تصویر هیستوگرامی نمونه.

3-3-مدول یانگ

برای تعیین مدول الاستیسیته از استاندارد ASTM E797-95 به روش پالس-اکو² و بر اساس تغییرات سرعت صوت در ماده استفاده شد. دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری سرعت صوت، ضخامت سنج مدل TC600 ساخت کشور کره بود که مکانیزم عملکرد آن در شکل 6 نشان داده شده است. فرستنده دستگاه (T) یک پالس کوتاه به درون ماده مورد سنجش می‌فرستد. این پالس از سطح دیگر ماده منعکس شده و توسط گیرنده دستگاه دریافت می‌شود. زمان طی شده پالس در نمونه، توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به دانسته‌ی محاسبه شده برای کامپوزیت‌ها، مدول الاستیسیته نمونه‌ها بر پایه استاندارد ASTM C1419 و بر اساس تغییرات سرعت صوت در نمونه محاسبه می‌شود. نمونه‌ها جهت تعیین مدول الاستیک بایستی کاملاً تمیز و بدون ناپوستگی مانند ترک‌های بزرگ باشند. بعد از آماده سازی نمونه‌ها، پالس مافوق صوتی با فرکانس 4 MHz تولید شده با دستگاه تبدیل انرژی الکتریکی به موج صوتی بر سطح نمونه ارسال و دریافت می‌شود. با ثبت زمان برگشت و

پیک 1396cm⁻¹ مربوط به ارتعاش‌های کششی C-O¹ (الکل‌ها) یا B-O (در صورت اکسید شدن بور) است. با توجه به حضور GQD (هرچند فقط حدود 0.3 درصد وزنی)، می‌تواند نشان‌دهنده‌ی گروه‌های اکسیژنی سطحی باقی مانده روی GQD باشد. پس این باند را می‌توان به C-O/B-O نسبت داد. مهم‌تر از آن پیک 1396 مربوط به C-C در ساختار آروماتیک نیز می‌باشد و با توجه به حضور نقاط کوانتومی گرافن این پیک می‌تواند ناشی از گروه‌های عاملی GQD می‌باشد. پیوند C-C جذب ضعیفی در طیف IR نشان می‌دهد اما وقتی کربن‌ها در یک حلقه‌ی آروماتیک مانند گرافن قرار گیرند، ارتعاش‌ها شدت بیشتری پیدا می‌کنند و قابل تشخیص خواهند شد. در این کامپوزیت، چون نقاط کوانتومی گرافن تکه‌های کوچکی از گرافن هستند بیشتر پیوندهای آن C=C و C-C می‌باشد بنابراین دیده شدن پیک 1396cm⁻¹ نشان‌دهنده‌ی شبکه‌های C-C گرافنی می‌باشد. همچنین پیک 869cm⁻¹ ناحیه‌ی مشخص برای Si-C در SiC است. این پیک تأیید حضور فاز SiC است، شدت پیک هم نشان‌دهنده‌ی درصد بالای این فاز در زمینه است (حدود 80 درصد وزنی). پیک‌های 729cm⁻¹ و 677cm⁻¹ هر دو در محدوده‌ی ارتعاشی Si-C و بخشی از Ti-O (اگر TiB₂ اکسید شده باشد) می‌باشند. در منابع، Si-C اغلب در بازه‌ی 700-870cm⁻¹ گزارش می‌شود، بنابراین احتمالاً این‌ها ترکیبی از ارتعاش‌های Si-C و اثرات احتمالی Ti-O هستند. پیک 638cm⁻¹ در محدوده‌ی Ti-O است، چون TiB₂ در شرایط هوا ممکن است کمی اکسید شود، این باند نشانه‌ی تشکیل جزئی TiO₂ می‌باشد. در حالت کلی، حضور SiC با باندهای 806، 723 و 677 تأیید می‌شود. با پیک‌های Ti-O در 583 قابل مشاهده است و در نهایت پیک 1308 که نشان‌دهنده‌ی گروه‌های C-O است می‌تواند ناشی از GQD باشد [26-30].

2-3-آنالیز AFM

برای بررسی چسبندگی و انرژی سطح در مقیاس نانو، سنجش اتصال بین فازی و نحوه‌ی توزیع فازهای تقویت کننده از آنالیز AFM استفاده شد، همچنین بررسی توپوگرافی سطح کامپوزیت، وجود خوشه‌ها یا تجمع نقاط کوانتومی گرافن، توزیع ذرات TiB₂ و یکنواختی فازها از اهداف آنالیز AFM است که نتایج آن در شکل 5 به نمایش درآمده است.

شکل 5a تصویر دو بعدی از توپوگرافی سطح را نشان می‌دهد که این تصویر خروجی اصلی AFM می‌باشد، مطابق شکل 5 تصویر a سطح کامپوزیت SiC-TiB₂-GQD ناهموار است و نقاط روشن‌تر نشان‌دهنده‌ی ارتفاع بیشتر (برجستگی‌ها) و نواحی تیره‌تر فرورفتگی هستند. تجمع‌های روشن‌تر می‌توانند مربوط به خوشه‌های TiB₂ یا کلوخه شدن نقاط کوانتومی گرافن باشند. به طور کلی، توزیع نسبتاً یکنواخت است ولی چند ناحیه با اختلاف سطح زیاد وجود دارد (این نشان‌دهنده‌ی خشن بودن سطح در برخی نقاط است). شکل 5b نمایانگر پروفایل خطی از خط افقی رسم شده بر روی تصویر دو بعدی شکل a (خط زرد رنگ) می‌باشد، مطابق شکل 5b وقتی یک خط از سطح انتخاب شده، تغییر ارتفاع به صورت نوسانات شدید ثبت شده است، در اینجا Gray Value متناظر با ارتفاع و Distance همان فاصله روی نمودار بر حسب پیکسل است. پیک‌های بلند و افت‌های سریع نشانه‌ی زبری سطح بالا و وجود ذرات برجسته است. تصویر 5c نیز تصویر سه بعدی سطح است که از طریق نرم افزار Image استخراج شده است، این تصویر به خوبی ناهمواری‌ها و قله‌های تیز را نشان

¹ Stretching
² Pulse-echo methode

که حضور مقادیر اندک GQD با پراکندگی یکنواخت در مرز دانه‌ها، انتقال بار بین فاز TiB₂ و زمینه را بهبود داده و مانع تمرکز کرنش¹ و تنش می‌شود. به عبارتی بهبود مدول یانگ و رسیدن به بیشینه مقدار آن در 0.3 درصد وزنی، به دو دلیل رخ می‌دهد، نخست وجود فاز سخت TiB₂ با مدول بالا (حدود 570GPa) که نقش فاز تقویت کننده‌ی اصلی را دارد، و دوم پراکندگی یکنواخت مقادیر کم GQD در مرزهای بین TiB₂ و زمینه‌ی SiC. افزودن مقدار اندک نقاط کوانتومی گرافن در این ناحیه سبب می‌شود که پیوند بین TiB₂ و زمینه SiC تقویت شود، زیرا صفحات گرافنی کوانتومی دارای سطح ویژه بالا و گروه‌های عاملی اکسیژنی و کربنی هستند که پیوند بین فازهای TiB₂ و زمینه را بهبود می‌دهند [31,32]. در چنین حالتی، انتقال تنش از زمینه به ذرات TiB₂ به صورت یکنواخت و کارآمد انجام می‌شود. به عبارت دیگر، در غیاب GQD یا در صورت پراکندگی غیر یکنواخت آن، در مرز بین TiB₂ و SiC اختلاف ضریب انبساط حرارتی و ناهمگنی مدول باعث می‌شود تنش‌های موضعی زیادی ایجاد شود. این تنش‌ها منجر به تمرکز کرنش در نواحی خاص شده و سبب کاهش مدول مؤثر و آغاز ریزترک‌های موضعی می‌شود. اما وقتی حتی مقدار کمی GQD به طور یکنواخت در فصل مشترک حضور دارد لایه‌های گرافنی نازک به عنوان پل‌های انتقال تنش² عمل می‌کنند، انرژی کرنش به صورت یکنواخت‌تری در سراسر فازها توزیع می‌شود و در نتیجه، ساختار ترکیب شده سفت‌تر و پایدارتر شده و مدول یانگ افزایش می‌یابد [33-36]. در مقادیر بالاتر (بیش از 0.3 درصد وزنی)، این تعادل به هم می‌خورد، زیرا ذرات گرافنی تجمع یافته و به جای بهبود پیوستگی، نواحی ضعیف بین فازهای ایجاد می‌کنند [37]. این پدیده موجب افزایش دوباره تمرکز تنش در اطراف کلوخه‌ها شده و کاهش مدول یانگ را به دنبال دارد. در بیش از مقدار بهینه، نوسان‌هایی دیده می‌شود ولی به صورت کلی روند نزولی است و در 2 درصد وزنی به حدود 334GPa کاهش می‌یابد. همانطور که بیان شد افت مدول در غلظت‌های بالاتر به علت تجمع GQD و کاهش پیوستگی فازهاست که مانع انتقال مؤثر تنش بین زمینه و ذرات تقویت کننده می‌شود.

3-4- تغییرات چقرمگی شکست و مدول یانگ بر حسب مقادیر متفاوت TiB₂ برای تعیین چقرمگی شکست نمونه‌ها از استاندارد ASTM C1421-10 استفاده شد. آماده‌سازی نمونه‌ها مشابه آماده‌سازی نمونه برای سختی سنجی است. با اعمال بار 0.5 kN به مدت 13 ثانیه به وسیله‌ی دستگاه سختی سنجی، تعداد سه اثر ویکرز بر هر نمونه اعمال شد. این اثر به وسیله‌ی نشانه‌گذار الماسی با سطح مقطع لوزی صورت گرفت. پس از ایجاد ترک در چهار گوشه محل نفوذ، با استفاده میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 400 برابر طول ترک شعاعی/میان‌ی (C) اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه‌ی 2 مقدار چقرمگی شکست (KIC) نمونه‌ها محاسبه شد. A ثابتی است که به جنس ماده بستگی ندارد و مقدار آن 0.016 است، E مدول الاستیسیته ماده برحسب N/m²، H سختی ویکرز برحسب GPa، P نیروی اعمالی برحسب N و C میانگین طول ترک از مرکز فرورونده برحسب m است. در هر نمونه سه اثر اعمال شد و سپس میانگین آن‌ها به عنوان چقرمگی شکست نهایی گزارش شد.

$$KIC = A \times (P/C^{3/2}) \times (E/H)^{1/2} \quad (2)$$

اندازه‌گیری ضخامت نمونه، سرعت صوت (V) عبوری از نمونه از طریق رابطه 1 به دست می‌آید.

$$E = \rho v^2 \quad (1)$$

E مدول الاستیسیته برحسب GPa، ρ چگالی نمونه برحسب g/cm³، V سرعت صوت در نمونه برحسب m/s² می‌باشد.

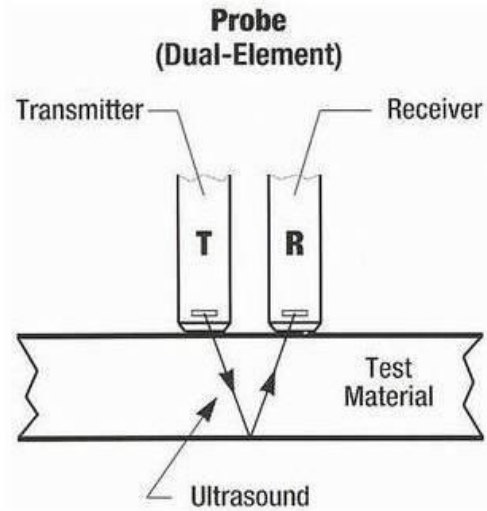


Fig. 6 Operating mechanism of ultrasonic thickness gauge

شکل 6 مکانیزم عملکرد دستگاه ضخامت سنج فراصوت

شکل 7 تغییرات میزان مدول یانگ بر حسب مقادیر متفاوت TiB₂ نشان

می‌دهد.

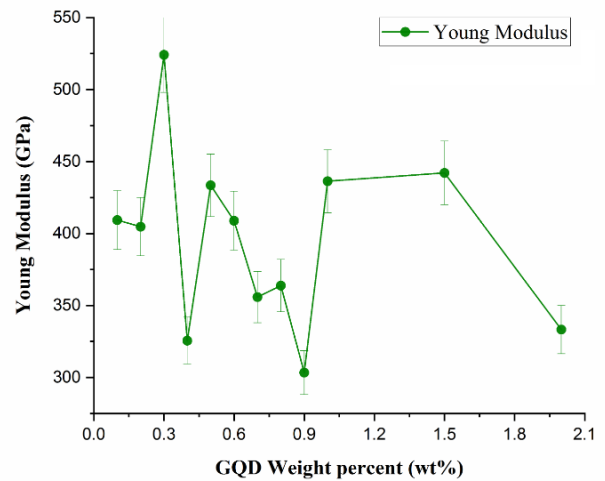


Fig. 7 Changes in Young's modulus depending on the GQD value

شکل 7 تغییرات مدول یانگ بر حسب مقدار GQD.

مطابق شکل 7 در ابتدای افزودن GQD (تا 0.3 درصد وزنی)، مدول یانگ به شدت افزایش یافته و از حدود 409GPa به 523.3GPa رسیده است. این افزایش معادل حدود 40 درصد بهبود در سفتی ماده است، دلیل آن این است

¹ Strain concentration

² Stress bridges

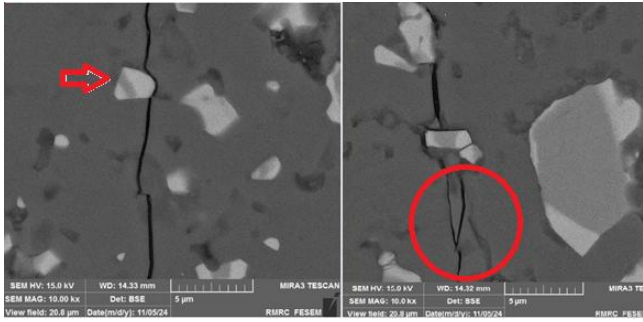


Fig.10 SEM images of the sample containing SiC=79.7wt%, TiB₂=20wt%, GQD=0.3wt%

شکل 10 تصاویر SEM نمونه‌ی حاوی SiC=79.7wt%, TiB₂=20wt%, GQD=0.3wt%

مطابق شکل 10، دو مکانیزم پل‌زنی¹ ترک و شاخه‌ای شدن² ترک، باعث از دست رفتن انرژی ترک اصلی شده و در نهایت موجب افزایش چقرمگی شکست کامپوزیت خواهد شد. این مکانیزم‌ها به این صورت عمل می‌کنند که وقتی ترک به سمت ذرات افزودنی یا فازهای متفاوت موجود در ساختار کامپوزیت منحرف می‌شود، مسیر ترک طولانی‌تر و پیچیده‌تر می‌شود. این باعث می‌شود انرژی شکست که برای ادامه‌ی حرکت ترک لازم است افزایش یابد، چون ترک دیگر مستقیم و کوتاه حرکت نمی‌کند. به زبان ساده‌تر ترک برای پیشروی مجبور است انرژی بیش‌تری مصرف کند، در نتیجه ماده چقرمگی بالاتری نشان می‌دهد. به علاوه، ایجاد ریزترک‌ها در مسیر ترک اصلی باعث پراکندگی انرژی و کاهش تمرکز تنش می‌شود [38,39].

3-6- تحلیل و نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی TiB₂ در کامپوزیت (با مقدار ثابت 0.3 درصد وزنی GQD) خواص مکانیکی ساختار به صورت غیر خطی تغییر می‌کنند، تمام سه ویژگی کلیدی سفتی، مدول یانگ و چقرمگی شکست همگام افزایش یافته و بیشینه‌ی خود را در 20 درصد وزنی TiB₂ نشان می‌دهند (مدول یانگ 526GPa و چقرمگی شکست 6.13MPa.m^{1/2}). تا این مقدار، توزیع یکنواخت ذرات TiB₂ و تعامل مناسب بین فازها منجر به بهبود انتقال بار، افزایش سفتی و فعال شدن مکانیزم‌های افزایش چقرمگی شکست مانند Crack deflection و Bridging شده است. افزایش بیش از 20 درصد وزنی موجب تجمع ذرات یا آگلومره شدن آن‌ها و همچنین ایجاد تخلخل موضعی شده که به کاهش یا نوسان خواص می‌انجامد.

4- مراجع

- [1] Liu, J., Li, Y., Cheng, C., Li, W., "Effect of TiB₂ content on microstructure and mechanical properties of SiC composite ceramics by solid-state spark plasma sintering", Journal of the Australian Ceramic Society, No.3, pp 971-978, 2024.
- [2] Mercurio Jr, S.R., "Effect of coprecipitation of sintering aids on the microstructure and grain boundary development of sintered silicon carbide", Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies, 2011.
- [3] Omori, M., Takei, H., "Pressureless Sintering of SiC", J. Am. Ceram. Soc. 65 (n.d.) c92-c92, No.10, 2015.
- [4] Du, Y., Schuster, J. C., Seifert, H. J., Aldinger, F., "Experimental investigation and thermodynamic calculation of the titanium-

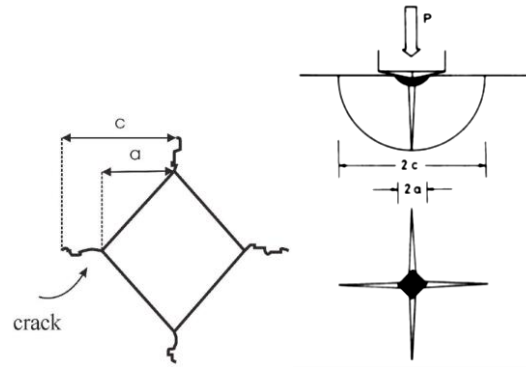


Fig. 8 Effect of loading the sample to determine fracture toughness

شکل 8 اثر بارگذاری نمونه جهت تعیین چقرمگی شکست [24]

شکل 9 تأثیر مقدار TiB₂ را بر چقرمگی شکست و مدول یانگ نشان می‌دهد. طبق نمودار، چقرمگی شکست و مدول یانگ در ابتدا نوسان نشان می‌دهند اما از مقدار 15 درصد وزنی به بعد روند افزایشی قوی را طی می‌کنند تا اینکه در 20 درصد وزنی TiB₂ بیشینه مقدار خود می‌رسند، در ادامه همانطور که انتظار می‌رفت روند کاهش خود را طی می‌کنند. طبق شکل، هر دو خاصیت تا 20 درصد وزنی به طور همزمان افزایش می‌یابند که این نشان از بهینه‌ترین نسبت TiB₂ برای استحکام و چقرمگی است. در بیش از این مقدار هر دو خاصیت روند کاهش خود را طی می‌کنند که نشانه‌ی اشباع فاز تقویتی و آغاز شکنندگی ساختار است. نقش GQD (در مقدار ثابت 0.3 درصد وزنی) کمک به توزیع تنش و جلوگیری از رشد خیلی سریع ترک، در کنار TiB₂ است.

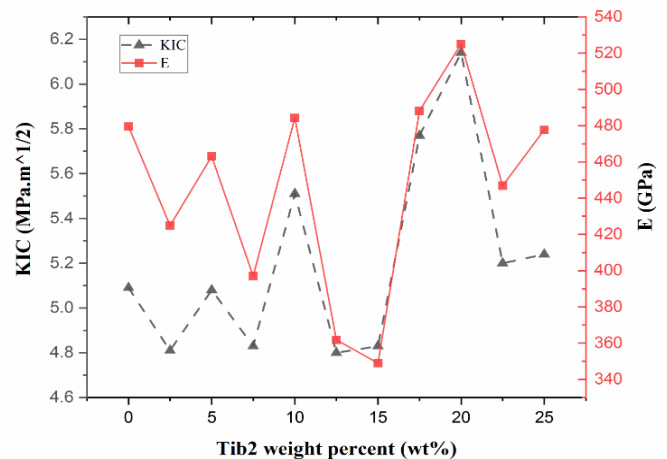


Fig. 9 Fracture toughness and Young's modulus of the composite depending on different amounts of TiB₂

شکل 9 مقدار چقرمگی شکست و مدول یانگ کامپوزیت بر حسب مقادیر متفاوت TiB₂

3-5- مکانیزم‌های افزایش چقرمگی شکست

شکل 10، تصاویر SEM نمونه‌ی حاوی SiC=79.7wt%, TiB₂=20wt%, GQD=0.3wt% را نشان می‌دهد.

¹ Crack Bridging
² Crack Branching

- [25] Tani, Toshihiko., "Processing, microstructure and properties of in-situ reinforced SiC matrix composites." *Composites part A: Applied science and manufacturing*, No. 4, pp 419-423, 1999.
- [26] Omar, M. F., Ismail, A. K., Sumpono, I., Alim, E. A., Nawi, M. N., Mukri, M. A. R., Sakrani, S. "FTIR spectroscopy characterization of Si-C bonding in SiC thin film prepared at room temperature by conventional 13.56 MHz RF PECVD", *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, No. 8(4), 2012.
- [27] Krishnamurthy, S., "Analysis of SCS-6 silicon carbide fibers by Fourier transform infrared spectroscopy", *Journal of materials research*, No. 12.2, pp 329-331, 1997.
- [28] Barghout N, Kashyout AE, Ibrahim MA, El Nemr A, "Novel Synthesis of SiC-SiO₂ Nanotubes from Cinachyrella sp. and Its Improvement of the Corrosion Resistance of Low Carbon Steel in 3.5% NaCl Water Solution", *Journal of Materials Engineering and Performance*, No.32(23), pp 10857-76, 2023.
- [29] Colthup, Norman. "Introduction to infrared and Raman spectroscopy", Elsevier, 2012.
- [30] Popov, Oleksii, et al. "Influence of reduced graphene oxide and T. Tani, Processing., "microstructure and properties of in-situ reinforced SiC matrix composites", *Compos. Part A Appl*, No.30, pp 419-423, 1999.
- [31] Trikkaliotis, D. G., Christoforidis, A. K., Mitropoulos, A. C., Kyzas, G. Z., Graphene oxide synthesis,"properties and characterization techniques: a comprehensive review", *ChemEngineering*, No. 5(3), pp64, 2021.
- [32] Donato, K. Z., Tan, H. L., Marangoni, V. S., Martins, M. V., Ng, P. R., Costa, M. C., Castro Neto, A. H., "Graphene oxide classification and standardization", *Scientific Reports*, No. 13(1), pp 6064, 2023.
- [33] Kovalčíková, A., Tatarko, P., Sedlak, R., Medved', D., Chlup, Z., Múdra, E., & Dusza, J., "Mechanical and tribological properties of TiB₂-SiC and TiB₂-SiC-GNPs ceramic composites", *Journal of the European Ceramic Society*, No. 40(14), pp 4860-4871, 2020.
- [34] Ovid'Ko, I. A., "Metal-graphene nanocomposites with enhanced mechanical properties: a review", *Reviews on Advanced Materials Science*, No. 38, 2014.
- [35] Madhankumar, A., Anthony Xavier., "Graphene reinforced ceramic matrix composite (GRCMC)-state of the art", *Engineering Research Express* 6, No. 2, 2024.
- [36] Asl, M. S., Ahmadi, Z., Moghanlou, F. S., Vajdi, M., & Shokouhimehr, M., "Nanocharacterization of spark plasma sintered TiB₂-SiC-graphene composites", *Materials Characterization*, PP 189- 198, 2022.
- [37] Zeinedini A, Shokrieh MM. "Agglomeration phenomenon in graphene/polymer nanocomposites: Reasons, roles, and remedies", *Applied Physics Reviews*, 2024.
- [38] Zeinedini A, Shokrieh MM, Ebrahimi A. "The effect of agglomeration on the fracture toughness of CNTs-reinforced nanocomposites", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, No.8 2018.
- [39] Zeinedini A., "Fracture toughness of graphene/polymer nanocomposites: well dispersion, agglomeration and toughening mechanisms", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, No.13, 2024.
- silicon-carbon system", *Journal of the American Ceramic Society*, No. 83.1 ,2000.
- [5] Lee, S.K., Kim, C.H., "Effects of α -SiC versus β -SiC Starting Powders on Microstructure and Fracture Toughness of SiC Sintered with Al₂O₃-Y₂O₃ Additives", *J. Am. Ceram. Soc*, No.131, pp 1655-1658, 2014.
- [6] Kovalčíková, A., Tatarko, P., Sedlák, R., Medved', D., Chlup, Z., Múdra, E., Dusza, J., "Mechanical and tribological properties of TiB₂-SiC and TiB₂-SiC-GNPs ceramic composites", *J. Eur. Ceram. Soc*, pp 40,4860-4871, 2020.
- [7] Liu, J., Li, Y., Cheng, C., Li, W., & Qin, X., "Effect of temperature on the structure and mechanical properties of SiC-TiB₂ composite ceramics by solid-phase spark plasma sintering", *Ceramics International*, No. 48, pp 23151-23158, 2022.
- [8] Kheyirinia, L., Baharvandi, H. R., Ehsani, N.,Yaghobizadeh, O., "Fabrication of SiC bodies by optimized gel-casting method", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, No. 81, pp 225-232, 2019.
- [9] Kheyirinia, L., Baharvandi, H. R., Ehsani, N.,Yaghobizadeh, O., "Fabrication and Properties of a Gel-Cast Dense Silicon Carbide Body", *Silicon*, No. 14.6, pp 2521-2532, 2022.
- [10] Vajdi, M., Sadegh Moghanlou, F., Nekahi, S., Ahmadi, Z., Motalebzadeh, A., Jafarzadeh, H., Shahedi Asl, M., "Role of graphene nano-platelets on thermal conductivity and microstructure of TiB₂-SiC ceramics", *Ceram. Int*, No. 46, pp 21775-21783, 2020.
- [11] Khodaei, M., Yaghobizadeh, O., Baharvandi, H.R., Dashti, A., "Effects of different sintering methods on the properties of SiC-TiC, SiC-TiB₂ composites", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*, No. 70, pp 19-31, 2018.
- [12] Pereira dos Santos Tonello, K., Padovano, E., Badini, C., Biamino, S., Pavese, M., Fino, P., "Fabrication and characterization of laminated SiC composites reinforced with graphene nanoplatelets", *Mater. Sci. Eng*, No.659, pp158-164, 2016.
- [13] Nieto, A., Bisht, A., Lahiri, D., Zhang, C., Agarwal, A., "Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites": a review, *Int. Mater. Rev*, No. 62, pp 241-302, 2017.
- [14] Kim, D.H., Kim, W.K., Woo, S.J., Wu, C., Kim, T.W., "Highly-reproducible nonvolatile memristive devices based on polyvinylpyrrolidone: Graphene quantum-dot nanocomposites", *Org. Electron*, No 17, 2017.
- [15] Bhatnagar, D., Kaur, I., Kumar, A., "Ultrasensitive cardiac troponin I antibody based nanohybrid sensor for rapid detection of human heart attack", *Int. J. Biol. Macromol*, 2017.
- [16] Gupta, S., Kaushal, A., Kumar, A., Kumar, D., "Ultrasensitive transglutaminase based nanosensor for early detection of celiac disease in human", *Int. J. Biol. Macromol*, pp 905-911, 2017.
- [17] Riedl, R., "Handbook of ceramic hard materials", Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [18] Tanaka, H., Inomata, Y., "Normal sintering of Al-doped β -SiC", *J. Mater*, pp 315-317, 1985.
- [19] Kim, K.J., Eom, J.-H., Kim, Y.-W., Seo, W.-S., Lee, M.-J., Hwang, S.S., "Highly resistive SiC ceramics sintered with Al₂O₃- AlN-Y₂O₃ additions", *Ceram. Int*, pp 5343-5346, 2017.
- [20] Khodaei, M., Yaghobizadeh, O., Ehsani, N., Baharvandi, H.R., Dashti, A., "The effect of TiO₂ additive on sinterability and properties of SiC-Al₂O₃-Y₂O₃ composite system", *Ceram. Int*, pp 16535-16645, 2018.
- [21] Raju, K., Yoon, D.-H., "Sintering additives for SiC based on the reactivity: A review", *Ceram. Int*, pp 17947-17962, 2016.
- [22] Magnani, G., Sico, G., Brentari, A., Fabbri, P., "Solid-state pressureless sintering of silicon carbide below 2000°C", *J. Eur. Ceram. Soc*, pp 344095-4098,2014.
- [23] Suri, A.K., Subramanian, C., Sonber, J.K., Murthy, T.S.R.C., "Synthesis and consolidation of boron carbide: a review", *Int. Mater*, No. 55, pp 4-40, 2010.
- [24] Liu, C.-Y., Tuan, W.-H., Chen, S.-C., "Ballistic performance of liquid-phase sintered silicon carbide", *Ceram. Int*, No. 39, pp 8253-8259, 2013.



بررسی خواص الیاف هیبریدی کامینگل شیشه/ پلی فنیلن سولفید و ارزیابی تاثیر آرایش الیاف بر خواص برشی میان لایه ای و کششی کامپوزیت های گرمانرم ساخته شده

میثم باقری بروج¹، محمد رضا محدث مجتهدی^{2*}، علیرضا خاوندی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-4413، mojtahed@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1404/11/09

پذیرش: 1405/03/17

کلیدواژگان

کامپوزیت گرمانرم تقویت شده با الیاف، الیاف کامینگل، پلی فنیلن سولفید، برس گرم.

در این مطالعه، ابتدا خواص الیاف هیبریدی کامینگل شیشه و پلی فنیلن سولفید از جمله خواص فیزیکی، حرارتی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه تأثیر آرایش الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت های گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه در زمینه پلی فنیلن سولفید نیز بررسی شد. ورق های کامپوزیتی با استفاده از نخ هیبریدی کامینگل شیشه/ پلی فنیلن سولفید و از طریق فرآیند پرس گرم در دو پیکربندی متفاوت ساخته شدند: (1) تقویت شده با الیاف پیوسته و تک جهته و (2) تقویت شده با الیاف کوتاه و با آرایش تصادفی. هدف اصلی، مقایسه مستقیم استحکام برشی میان لایه ای و خواص کششی این دو ساختار به منظور درک نقش جهت گیری الیاف در عملکرد نهایی محصول بود. نتایج آزمون های مکانیکی نشان دهنده ناهمسانگردی شدید در نمونه های تک جهته بود؛ به طوری که استحکام کششی در جهت طولی (289 مگاپاسکال) به مراتب بالاتر از جهت عرضی (5 مگاپاسکال) و نمونه های با الیاف خرد شده (61 مگاپاسکال) بود. به طور مشابه، مقدار استحکام برشی میان لایه ای در نمونه تک جهته (18.7 مگاپاسکال) به شکل چشمگیری بیشتر از نمونه های با الیاف تصادفی (7 مگاپاسکال) بود. نوآوری اصلی این مطالعه، تمرکز بر الیاف شیشه/ پلی فنیلن سولفید استفاده از نخ هیبریدی کامینگل به منظور بهبود آغشتگی و یکپارچه سازی الیاف و زمینه، و مقایسه مستقیم دو آرایش تقویت کننده شامل الیاف پیوسته تک جهته و الیاف کوتاه با توزیع تصادفی است.

Investigation of the properties of glass/polyphenylene sulfide commingled hybrid fibers and evaluation of the effect of fiber arrangement on the interlaminar shear and tensile properties of fabricated thermoplastic composites

Meysam Baghery Boroj¹, Mohammad Reza Mohaddes Mojtahedi^{1*}, Alireza Khavandi²

1- Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- School of Material Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, mojtahed@aut.ac.ir

Keywords

Fiber-reinforced thermoplastic composite, Commingled Fibers, Polyphenylene sulfide, Hot press

Abstract

In this study, the properties of glass/polyphenylene sulfide commingled hybrid fibers were first investigated, including physical, thermal, and SEM images, and then the effect of fiber arrangement on the mechanical properties of glass-fiber reinforced thermoplastic composites in polyphenylene sulfide was also investigated. Composite sheets were fabricated using glass-comingled/PPS hybrid yarns through a hot pressing process in two different configurations: (1) reinforced with continuous, unidirectional fibers and (2) reinforced with short fibers and randomly arranged. The main objective was to directly compare the interlaminar shear strength (ILSS) and tensile properties of these two structures in order to understand the role of fiber orientation in the final product performance. The results of mechanical tests showed strong anisotropy in unidirectional samples; such that the tensile strength in the longitudinal direction (289 MPa) was much higher than that in the transverse direction (5 MPa) and chopped fiber samples (61 MPa). Similarly, the ILSS value of the unidirectional sample (18.7 MPa) was significantly higher than that of the random fiber samples (7 MPa). The main novelty of this study is its focus on glass/PPS fibers, the use of hybrid commingled yarn to improve impregnation and integration of the fibers and matrix, and the direct comparison of two reinforcement configurations, namely continuous unidirectional fibers and short fibers with random distribution.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های گرمانرم به دلیل ترکیبی از خواص منحصربه‌فرد شامل چقرمگی شکست بالا، مقاومت به ضربه عالی، پایداری شیمیایی و قابلیت بازیافت، به عنوان جایگزین‌های قدرتمند برای کامپوزیت‌های گرماسخت سنتی و فلزات در کاربردهای سازه‌ای پیشرفته ظهور کرده‌اند [1، 2]. برخلاف زمینه‌های گرماسخت که دارای شبکه‌ای برگشت‌ناپذیر هستند، پلیمرهای گرمانرم را می‌توان به دفعات ذوب و شکل‌دهی کرد که این ویژگی، ضمن فراهم آوردن امکان تولید سریع و اقتصادی، به توسعه اقتصاد چرخشی در صنعت مواد کمک شایانی می‌کند [3، 4]. با این حال، دستیابی به پتانسیل کامل این مواد مستلزم غلبه بر چالش ذاتی آن‌ها، یعنی گرانروی بالای مذاب پلیمری است که می‌تواند منجر به آغشته‌سازی ناقص الیاف تقویت‌کننده و در نتیجه، تضعیف یکپارچگی ساختاری و خواص مکانیکی محصول نهایی شود [5].

تکنیک‌های ساخت کامپوزیت‌های گرمانرم به طور قابل توجهی به شکل و طول الیاف تقویت‌کننده وابسته است. در میان این روش‌ها، فرآیند پرس گرم یا قالب‌گیری فشاری به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در استفاده از پیش‌فرم‌های مختلف (مانند پارچه‌ها، الیاف کوتاه یا نوارهای تک‌جهته) و قابلیت تولید قطعات با هندسه تخت یا دارای انحنا ملایم، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی است [6].

در این میان، پلی‌فنیلن سولفید¹ به عنوان یک پلیمر مهندسی با عملکرد بالا، به دلیل مقاومت حرارتی استثنایی (دمای ذوب حدود 280°C)، پایداری ابعادی عالی و مقاومت برجسته در برابر طیف وسیعی از مواد شیمیایی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این ویژگی‌ها پلی‌فنیلن سولفید را برای کاربردهایی که نیازمند پایداری در محیط‌های خشن هستند، ایده‌آل می‌سازد. با این حال، شکنندگی ذاتی و رفتار تبلور پیچیده آن، ایجاب می‌کند که برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، با الیاف مناسب تقویت گردد.

آغشته‌سازی کامل الیاف تقویت‌کننده با زمینه پلیمری، کلید دستیابی به کامپوزیت‌هایی با عملکرد بالاست. برای تسهیل این فرآیند در پلیمرهای با گرانروی بالا، راهکارهای متعددی توسعه یافته است که از آن جمله می‌توان به آغشته‌سازی با پودر، استفاده از فیلم‌های پلیمری و یا پلیمریزاسیون درجا اشاره کرد [7، 8، 9]. استفاده از الیاف هیبریدی شامل الیاف تقویت‌کننده و پلیمرهای گرمانرم، یکی از روش‌های جدید آغشته‌سازی در پروسه تولید کامپوزیت‌های گرمانرم می‌باشد که به دلیل نزدیکی هر دو جزء الیاف تقویت‌کننده و الیاف پلیمری، محصول نهایی کیفیت بالایی را دارا می‌باشد.

نخ‌های هیبریدی کامینگل²، که در آن‌ها رشته‌های الیاف تقویت‌کننده و زمینه پلیمری به صورت یکنواخت و همگن در هم آمیخته شده‌اند، یک راهکار بسیار مؤثر برای حل مشکل آغشته‌سازی ارائه می‌دهند [10، 11]. این ساختار منحصربه‌فرد با به حداقل رساندن مسیر جریان مذاب پلیمر، فرآیند یکپارچه‌سازی را در حین پرس گرم به شدت تسریع و تسهیل کرده و منجر به ساختاری با حفرات کمتر و فصل مشترک قوی‌تر می‌شود [12، 13، 14].

پیشینه تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از نخ‌های هیبریدی در ساخت کامپوزیت‌های گرمانرم با زمینه‌های مختلف پلیمری مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌امید و پلی‌اتیلن ترفتالات به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [15، 16، 17]. این مطالعات نشان داده‌اند که کیفیت توزیع الیاف در نخ هیبریدی و شرایط فرآیندی، تأثیر مستقیمی بر خواص نهایی محصول دارد. در پژوهشی توسط ژانگ و همکاران، کامپوزیت‌های شیشه/پلی‌فنیلن سولفید با

آرایش تک‌جهته تولید شدند و استحکام کششی طولی حدود 300 تا 350 مگا پاسکال و استحکام برشی میان‌لایه‌ای حدود 20 مگا پاسکال گزارش شد. نتایج این مطالعه نشان داد هم‌راستایی مناسب الیاف و توزیع یکنواخت زمینه نقش مهمی در بهبود انتقال بار و افزایش خواص مکانیکی دارند [18]. در مطالعه‌ای دیگر، کیم و همکاران رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت‌شده با الیاف شیشه کوتاه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد استحکام کششی نمونه‌های دارای الیاف کوتاه تصادفی به‌طور محسوسی کمتر از ساختارهای تک‌جهته است. این کاهش عملکرد به جهت‌گیری تصادفی الیاف، کوتاه بودن طول مؤثر الیاف و افزایش تمرکز تنش نسبت داده شد [19]. مازور و همکاران تأثیر نخ‌های هیبریدی کامینگل را بر کیفیت آغشته‌گری در کامپوزیت‌های گرمانرم بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد استفاده از ساختار کامینگل موجب کاهش فاصله نفوذ مذاب تا الیاف، بهبود توزیع زمینه و کاهش حفرات داخلی می‌شود و در نتیجه استحکام برشی میان‌لایه‌ای بهبود می‌یابد [20]. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه کامپوزیت‌های گرمانرم، بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نخ‌های هیبریدی کامینگل شیشه/پلی‌فنیلن سولفید (شیشه/پلی‌فنیلن سولفید) و تولید کامپوزیت از آن‌ها با استفاده از روش پرس گرم یک رویکرد کاملاً نوین محسوب می‌شود. از این رو، ساخت این نوع کامپوزیت و ارزیابی خواص مکانیکی آن، نوآوری اصلی پژوهش حاضر به شمار می‌رود و خلأ اطلاعاتی موجود در این حوزه را برطرف می‌سازد. در این تحقیق، به طور مشخص به بررسی تأثیر آرایش الیاف بر خواص مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی ساخته‌شده از نخ هیبریدی کامینگل شیشه/پلی‌فنیلن سولفید پرداخته می‌شود. هدف اصلی، مقایسه کمی عملکرد مکانیکی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته و تک‌جهته با نمونه‌های حاوی الیاف کوتاه و با آرایش تصادفی است. برای این منظور، ورق‌های کامپوزیتی با استفاده از فرآیند پرس گرم تولید شده و خواص کلیدی آن‌ها، شامل استحکام برشی میان‌لایه‌ای³ و استحکام کششی، اندازه‌گیری و تحلیل می‌گردد تا درک عمیق‌تری از رابطه میان ساختار و خاصیت در این دسته از مواد پیشرفته حاصل شود.

2- تجربیات

2-1- ماده اولیه

ماده اولیه مورد استفاده در این پژوهش، نخ هیبریدی کامینگل با نام تجاری کامپوفیل⁴، محصول شرکت جوشی بود. این نخ از درهم‌آمیزی یکنواخت رشته‌های پیوسته شیشه (به عنوان فاز تقویت‌کننده) و رشته‌های پلی‌فنیلن سولفید (پلی‌فنیلن سولفید) (به عنوان زمینه گرمانرم) از طریق فرآیند دمش هوای پرفشار حاصل شده است. این ساختار پیش‌آغشته، توزیع همگن دو فاز را تضمین کرده و فرآیند یکپارچه‌سازی در مراحل بعدی را تسهیل می‌نماید.

2-2- ارزیابی ماده اولیه

2-2-1- ارزیابی خواص الیاف

جهت ارزیابی الیاف کامینگل شیشه/پلی‌فنیلن سولفید، خواص فیزیکی مانند قطر الیاف، مساحت سطح، چگالی حجمی و چگالی خطی، مورد مطالعه قرار گرفت.

محاسبه نمره نخ با توجه به استاندارد ایزو 1889 مطابق فرمول زیر انجام گرفت که در 5 تکرار، نمونه‌هایی به طول 10 متر به صورت تصادفی از

³interlaminar shear strength

⁴ CompoFil

¹ Polyphenylene sulfide

² Commingled

رفتار حرارتی، شامل دماهای انتقال فاز مانند دمای انتقال شیشه‌ای، دمای تبلور و دمای ذوب، با استفاده از دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی^۴ (مدل S800) و مطابق با استاندارد ASTM D3418 مطالعه شد. نمونه‌ای به وزن تقریبی 10 میلی‌گرم در یک بوته آلومینیومی قرار داده شد و در اتمسفر نیتروژن با نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای 550 درجه سانتی‌گراد گرم شد.

2-3- ساخت ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

به منظور ایجاد یک درک بنیادین از رفتار کامپوزیت‌های شیشه/پلی فنیلن سولفید و ایزوله کردن تأثیر آرایش الیاف از متغیرهای فرآیندی پیچیده، سه نوع ورق کامپوزیتی با استفاده از روش پرس گرم تولید گردید. این مرحله مقدماتی امکان مقایسه مستقیم میان دو معماری تقویت‌کننده اصلی را فراهم آورد: الیاف کوتاه با توزیع تصادفی و الیاف پیوسته با آرایش تک‌جهته.

برای این منظور، سه پیکربندی مجزا طراحی شد: 1. ورق با الیاف خردشده (ضخامت 1 میلی‌متر): نخ کامینگل به طول 2.5 سانتی‌متر برش داده شد (شکل 1) و به صورت کاملاً تصادفی و یکنواخت درون یک قالب مربعی به ابعاد 205×205 میلی‌متر توزیع گردید (شکل 2). هدف، ایجاد یک ساختار همسانگرد با ضخامت نهایی تقریبی 1 میلی‌متر بود. 2. ورق با الیاف خردشده (ضخامت 2 میلی‌متر): این نمونه مشابه نمونه اول تهیه شد، با این تفاوت که مقدار الیاف افزایش یافت تا ورقی با ضخامت نهایی تقریبی 2 میلی‌متر حاصل شود. این کار به منظور بررسی تأثیر جزئی افزایش کسر حجمی الیاف در ساختارهای تصادفی انجام گرفت. 3. ورق با الیاف تک‌جهته (ضخامت 1.7 میلی‌متر): در این حالت، رشته‌های پیوسته نخ کامینگل با دقت و به صورت کاملاً موازی در راستای طول قالب چیده شدند (شکل 3) تا یک ساختار کاملاً ناهمسانگرد با حداکثر خواص مکانیکی در یک جهت ایجاد شود. برای انجام یک مقایسه علمی، کسر حجمی الیاف در تمامی نمونه‌ها برابر می‌باشد تا تنها اثر آرایش الیاف به عنوان متغیر مستقل ارزیابی شود.



Fig. 1 Image of fibers cut to 2.5 cm in length

شکل 1 تصویر الیاف خردشده به طول 2.5 سانتی‌متر

بخش‌های مختلف بسته الیاف جدا شده و مورد سنجش وزنی قرار گرفت. اندازه‌گیری نمره نخ بر روی نخ‌های کامینگل پیوسته و پیش از فرآیند برش به الیاف کوتاه انجام شد.

$$T_x = \frac{P \times 1000}{L} \quad (1)$$

نمره نخ بر حسب تکس T_x

P وزن الیاف بر حسب گرم

L طول الیاف بر حسب متر

مساحت سطح الیاف نیز از تقسیم نمره نخ بر چگالی حجمی مطابق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$A = \frac{T_x}{\rho} \times 10^{-3} \quad (2)$$

A مساحت سطح الیاف (mm^2)

ρ چگالی حجمی بر حسب $\frac{g}{cm^3}$

با توجه به اینکه نمره نخ بر حسب tex ($g/1000 m$) و چگالی بر حسب g/cm^3 بیان می‌شود، ضریب 3-10 برای تبدیل واحدها و محاسبه سطح مقطع بر حسب mm^2 استفاده شده است.

تعیین چگالی حجمی الیاف منطبق با آزمون ASTM D792 با غوطه ور نمودن 5 گرم الیاف در آب مقطر انجام گرفت.

بررسی قطر الیاف با استفاده از میکروسکوپ پروجکتینا (آلمان) با بزرگنمایی 382.5 برابر، انجام گرفت. 10 نمونه الیاف به صورت تصادفی از میان دسته الیاف جدا شد و به صورت افقی بر روی یک شیشه چیده شد و با یک شیشه پوششی پوشانده شد. روی شیشه روکش، یک خط علامت کشیده شده بود که با حرکت عمودی نمونه، ضخامت الیاف در طول خط با دقت 0.1 میکرومتر مطابق با استاندارد ایزو 137 مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی مورفولوژی الیاف با ارزیابی تصاویر الیاف تهیه شده از میکروسکوپ نوری زایس (آلمان) و نرم افزار مربوط به آن نیز انجام شد (بزرگ نمایی 40×).

2-2-2- مطالعه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱

برای بررسی دقیق ریخت‌شناسی سطح و مقطع الیاف و همچنین شناسایی ترکیب عنصری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (کره جنوبی، مدل AIS 2100) استفاده شد. نمونه‌ها با ولتاژ شتاب‌دهنده 15 کیلوولت مورد بررسی قرار گرفتند. این دستگاه مجهز به آشکارساز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس² بود که برای تحلیل کیفی و کمی عناصر تشکیل‌دهنده هر یک از فازهای الیاف به کار گرفته شد. آزمون آشکارساز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس به صورت موضعی بر روی رشته‌های مجزای شیشه و پلی فنیلن سولفید در نخ هیبریدی کامینگل انجام شد. بدین منظور، نقاط مشخصی از هر فاز به صورت جداگانه انتخاب و ترکیب عنصری آن‌ها تحلیل گردید.

2-2-3- آزمون گرمایی

رفتار تخریب حرارتی و کسر وزنی اجزای تشکیل‌دهنده نخ هیبریدی با استفاده از آزمون گرماسنجی وزنی^۳ (مدل F3 209) و بر اساس استاندارد ASTM E1131 ارزیابی شد. نمونه‌ای به وزن تقریبی 4.5 گرم در اتمسفر نیتروژن و با نرخ گرمایش 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از دمای محیط تا 900 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا منحنی کاهش وزن بر حسب دما ثبت گردد.

¹ scanning electron microscopy

² Energy Dispersive Spectroscopy

³ Thermogravimetric analysis

⁴ Differential Scanning Calorimetry

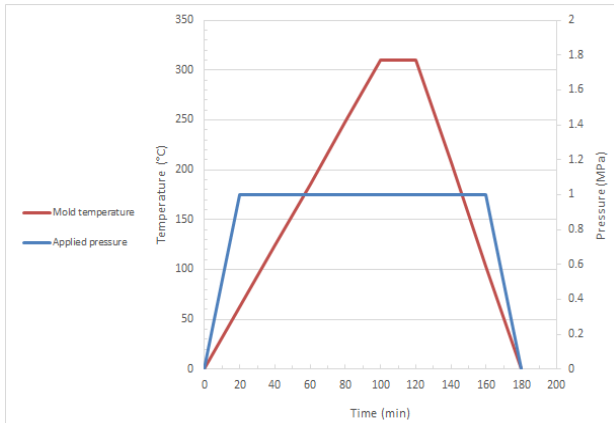


Fig. 4 Temperature-pressure application chart over time for sheet production

شکل 4 نمودار اعمال دما-فشار بر حسب زمان جهت تولید ورق



Fig. 2 Image of a frame containing chopped fibers for producing sheets with a random arrangement

شکل 2 تصویر قاب حاوی الیاف خردشده جهت تولید ورق با آرایش تصادفی

4-2- ارزیابی ورق‌های تولید شده

1-4-2- ارزیابی استحکام برشی میان لایه‌ای

استحکام برشی میان لایه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D2344 و با استفاده از آزمون برش شعاع کوتاه¹ اندازه‌گیری شد. آزمون‌ها بر روی دستگاه یونیورسال (آمریکا، مدل 5566) انجام گرفت (شکل 5). نمونه‌هایی با ابعاد 30×10 میلی‌متر از ورق‌های تولیدی بریده شده و با فاصله دو فک 20 میلی‌متر و سرعت بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. با نتایج به دست آمده و فرمول زیر می‌توان مقدار استحکام برشی میان لایه‌ای را محاسبه کرد:

$$ILSS = 0.75 \frac{P_b}{b \times d} \quad (3)$$

ILSS استحکام برشی میان لایه‌ای، MPa

P_b نیروی شکست، N

b و d به ترتیب عرض و ضخامت نمونه‌ها، mm

تعداد 5 نمونه در دما و رطوبت محیط به منظور گزارش استحکام برشی میان لایه‌ای برای کامپوزیت تهیه شده از هر یک از حالات، ارزیابی شد.



Fig. 5 Devices and equipment used to perform the ILSS test

شکل 5 دستگاه و فک استفاده شده جهت انجام آزمون استحکام برشی میان لایه‌ای



Fig. 3 Image of a frame containing unidirectional fibers for sheet production

شکل 3 تصویر قاب حاوی الیاف تک‌جهته جهت تولید ورق

1-3-2- روش تولید ورق کامپوزیتی

فرآیند تولید ورق‌ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیک مجهز به هیت‌های کارت리지 و سیستم کنترل دما انجام شد. برای ساخت هر ورق، ابتدا قالب فولادی با ابعاد داخلی 205×205 میلی‌متر با واکس جداکننده پوشش داده می‌شد. سپس یک لایه فیلم جداکننده (کاپتون) و پارچه تفلون در کف قالب قرار می‌گرفت. پس از چیدن الیاف (خردشده یا تک‌جهته) درون قالب، لایه‌های جداکننده بالایی نیز قرار داده می‌شدند. مجموعه قالب در میان صفحات پرس قرار گرفته و تحت سیکل دما-فشار مشخصی (شکل 4) قرار می‌گرفت. این سیکل شامل یک مرحله گرمایش تا دمای 310 درجه سانتی‌گراد، یک دوره نگهداری به مدت 20 دقیقه تحت فشار 1 مگاپاسکال برای اطمینان از ذوب کامل پلی فنیلن سولفید و آغشته‌سازی الیاف، و در نهایت یک مرحله خنک‌سازی کنترل شده تا دمای محیط بود.

¹ Short-Beam Shear

2-4-2- استحکام کششی کامپوزیت‌ها

توزیع و مورفولوژی هر جزء را فراهم می‌آورد. اندازه‌گیری دقیق قطرها نشان داد که قطر الیاف شیشه 18.1 ± 2.1 میکرومتر و قطر الیاف پلی فنیلن سولفید برابر با 21.2 ± 0.9 میکرومتر است. یکنواختی بالای قطر الیاف پلی فنیلن سولفید به فرآیند تولید دقیق آن (ذوب‌ریسی) نسبت داده می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی الیاف نشان‌دهنده توزیع مناسب و درهم‌تنیدگی دو فاز است. این آرایش که در آن الیاف شیشه توسط الیاف پلی فنیلن سولفید احاطه شده‌اند، برای دستیابی به آغشته‌سازی کامل در طی فرآیند پرس گرم بسیار مطلوب است.

همانطور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، سطح طولی الیاف شیشه و پلی فنیلن سولفید کاملاً صاف و عاری از هرگونه ترک، خراش یا نقص قابل مشاهده است. این ویژگی سطحی یکنواخت، برای تضمین دوام و مقاومت بالا در برابر تنش‌های مکانیکی در کامپوزیت نهایی، حیاتی است.

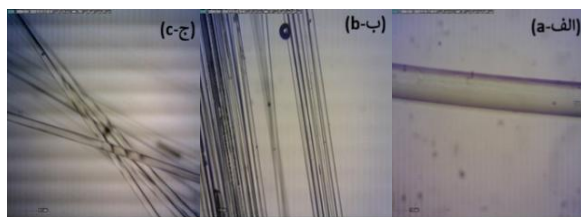


Fig. 7 Optical microscope images of: (a) single fiber surface, (b) fiber bundle surface, and (c) longitudinal knot on the fiber surface

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ نوری، (الف) سطح تک لیف، (ب) سطح دسته الیاف، (ج) گره طولی در سطح الیاف الف

خواص کششی ورق‌های کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM D3039 و با استفاده از دستگاه یونیورسال (آمریکا، مدل 5566) تعیین گردید (شکل 6). نمونه‌های آزمون با ابعاد 250×25 میلی‌متر توسط برش واترجت تهیه شدند تا از آسیب حرارتی به لایه‌ها جلوگیری شود. پس از برش واترجت، لایه نمونه‌ها به‌صورت چشمی و نیز میکروسکوپ نوری بررسی شدند و نشانه آشکاری از جدایش لایه‌ای یا ایجاد شیار مؤثر مشاهده نشد. آزمون‌ها با سرعت کرنش ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه در دمای محیط انجام شد و کرنش از طریق جابه‌جایی فک‌های دستگاه آزمون یونیورسال محاسبه شد و از کرنش سنج استفاده نگردید. برای آزمون کشش، 5 نمونه برای هر حالت آزمایش شده است تا تکرارپذیری نتایج و انحراف معیار استاندارد تضمین شود.

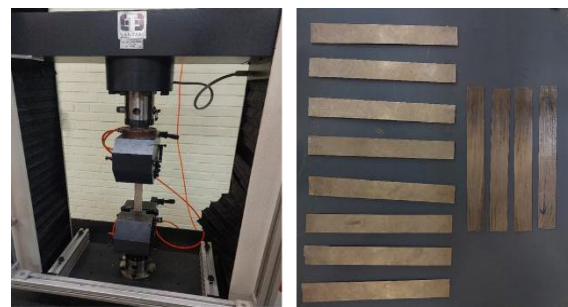


Fig. 6 Image of composite samples for tensile strength testing

شکل 6 تصویر نمونه‌های کامپوزیتی حین انجام آزمون استحکام کششی

3-4-3- مطالعه میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور تحلیل سازوکارهای شکست و ارزیابی کیفیت فصل مشترک الیاف-زمینه پلیمری، سطوح شکست نمونه‌های کامپوزیتی پس از آزمون‌های مکانیکی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (کره جنوبی، مدل AIS 2100) مورد مطالعه قرار گرفت. این بررسی امکان مشاهده دقیق نحوه شکست زمینه پلیمری، بیرون کشیدگی الیاف¹ و کیفیت چسبندگی در فصل مشترک را فراهم آورد.

3- نتایج و بحث

3-1- مشخصه‌یابی الیاف

مشخصه‌یابی دقیق خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی نخ هیبریدی کامپوزیت، به عنوان پیش‌نیاز اصلی برای درک رفتار کامپوزیت نهایی، در این بخش ارائه می‌گردد.

3-1-1- تصاویر میکروسکوپ نوری

با وجود اینکه بررسی‌های اولیه با میکروسکوپ نوری (شکل 7، بخش‌های الف-ا، ب-ب، ج-ج) یکنواختی قطر الیاف (با میانگین 20.9 ± 1.2 میکرومتر) را تأیید کرد، تشابه ظاهری کامل الیاف شیشه و پلی فنیلن سولفید امکان تفکیک آن‌ها را با این روش مقدر نداشت. از این رو، برای شناسایی دقیق‌تر و بررسی جزئیات مورفولوژیکی، به مطالعه با میکروسکوپ الکترونی روبشی نیاز بود.

3-1-2- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل 8) به وضوح نشان‌دهنده دو فاز متمایز در الیاف هستند: الیاف روشن‌تر (A) که مربوط به شیشه و الیاف تیره‌تر (B) که نشان‌دهنده پلی فنیلن سولفید است. این کنتراست، که با تحلیل آشکارساز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس تأیید شد، امکان تحلیل دقیق‌تر

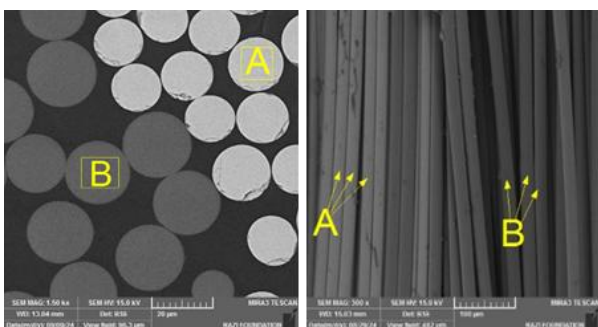


Fig. 8 SEM microscope images of the cross-sectional and longitudinal surfaces of the two fiber components (A glass fibers and B PPS fibers)

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع عرضی و طولی دو جزء الیاف (A الیاف شیشه و B الیاف پلی فنیلن سولفید)

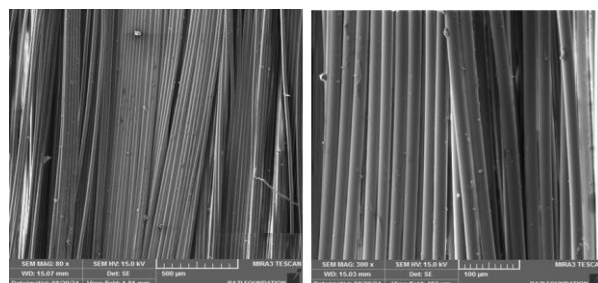


Fig. 9 SEM microscope images of the longitudinal surface of the fibers at different magnifications

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح طولی الیاف در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

¹ fiber pull-out

3-1-3- آزمون آشکارساز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس

جهت تفکیک دو جزء الیاف شیشه و پلی فنیلین سولفید ، آزمون طیفسنجی پراش انرژی نیز بر روی الیاف انجام شد (شکل 10 و 11).

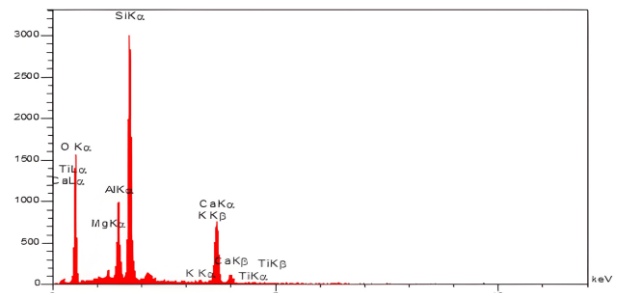


Fig. 10 EDS analysis of glass fibers

شکل 10 نمودار آشکارساز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس الیاف شیشه

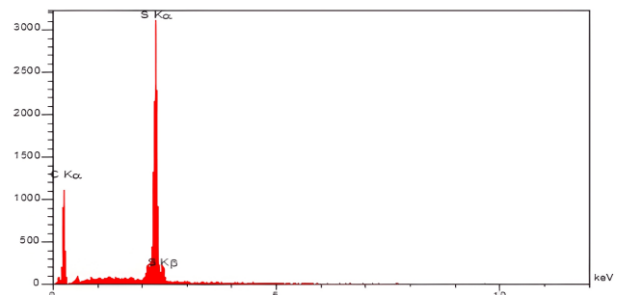


Fig. 11 EDS analysis of PPS

شکل 11 نمودار آشکارساز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس الیاف پلی فنیلین سولفید

3-1-4- آزمون حرارتی

آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (شکل 12) یک پیک ذوب اندوترمیک مشخص را در حدود دمای 290 درجه سانتی گراد نشان می دهد که مؤید دمای ذوب پلیمر پلی فنیلین سولفید است. عدم مشاهده پیک های واضح برای دمای انتقال شیشه ای و دمای تبلور را می توان به تأثیر محدودکنندگی شبکه الیاف شیشه بر دینامیک زنجیره های پلیمری پلی فنیلین سولفید نسبت داد که این پدیده در کامپوزیت های تقویت شده با الیاف رایج است.

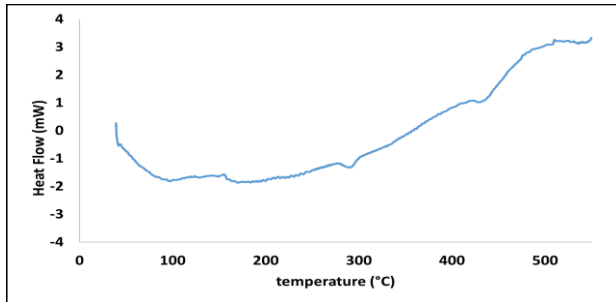


Fig. 12 DSC test chart of glass fiber and PPS combination

شکل 12 نمودار آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی ترکیب الیاف شیشه و پلی فنیلین سولفید

نتایج آزمون گرماسنجی وزنی (شکل 13) پایداری حرارتی بالای نخ هیبریدی را تأیید می کند. فرآیند تخریب اصلی از حدود دمای 500 درجه سانتی گراد آغاز می شود. بر اساس وزن باقی مانده پس از تجزیه کامل فاز پلیمری، کسر وزنی الیاف شیشه در کامپوزیت برابر با 36.91٪ محاسبه شد. نمودار مشتق وزن (شکل 14) نیز قله تخریب اصلی را در دمای 519 درجه سانتی گراد نشان می دهد. همان گونه که از نمودار آزمون گرماسنجی وزنی مشخص است در دماهای پایین تر از 150 درجه سانتی گراد تغییرات وزنی عمدتاً به خروج رطوبت فیزیکی جذب شده و تبخیر ترکیبات فعال سطحی همانند سائزینگ و روغن ریسندگی موجود بر روی الیاف و شروع فرسایش پلی فنیلین سولفید نسبت داده می شود ولی به طور کلی اگرچه گذار شیشه ای ماهیت تغییر وزنی ندارد، اما ظهور پیک در دمای 99.37°C نشان دهنده شروع افزایش تحرک زنجیره های آمورف است. در این لحظه، مواد فرار با وزن مولکولی پایین (نظیر رطوبت محبوس در فصل مشترک یا اجزای سبک عامل جفت کننده الیاف) که تا پیش از این در شبکه صلب پلیمر محبوس بودند، امکان خروج می یابند. این کاهش وزن بسیار ناچیز، توسط سنسورهای دقیق آزمون گرماسنجی وزنی ثبت شده و هم زمانی تقریبی آن با بازه متداول T_g برای پلی فنیلین سولفید ممکن است به عنوان یک امضای حرارتی برای T_g در نمودار مشتق ظاهر شده باشد. با این حال، شناسایی قطعی T_g همچنان بیشتر بر مبنای آزمون های حرارتی نظیر گرماسنجی روبشی تفاضلی قابل استناد است. نوسان جزئی مشاهده شده در حدود 267°C در نمودار مشتق منحنی گرماسنجی وزنی نیز می تواند ناشی از تغییرات بسیار محدود در جرم نمونه با آزاد شدن ترکیبات سبک باقی مانده در ساختار پلیمر باشد. اگرچه این دما در محدوده ای قرار دارد که با رخداد تبلور سرد در پلی فنیلین سولفید همپوشانی دارد، اما با توجه به ماهیت جرمی آزمون گرماسنجی وزنی، نسبت دادن قطعی این تغییر به فرآیند تبلور مجدد امکان پذیر نیست. بنابراین این تغییر تنها به عنوان یک نوسان حرارتی احتمالی در این بازه دمایی گزارش می شود رخداد تبلور اساساً از نوع تغییرات گرمایی است و تأیید رخداد تبلور نیازمند آزمون های

نتایج نشان می دهد که الیاف شیشه (جدول 1) از سیلیسیم، اکسیژن و کربن تشکیل شده است، در حالی که الیاف پلی فنیلین سولفید (جدول 2) عمدتاً حاوی کربن و گوگرد است. وجود نسبت بالای کربن، به استحکام و پایداری شیمیایی پلی فنیلین سولفید کمک می کند و آن را در برابر حرارت و مواد شیمیایی مقاوم می سازد، در حالی که گوگرد به پلی فنیلین سولفید خاصیت مقاومتی در برابر عوامل خوردنده می دهد. این ترکیب عناصر، پلی فنیلین سولفید را به ماده ای مناسب برای کاربردهایی با شرایط محیطی سخت تبدیل می کند.

جدول 1 درصد عناصر تشکیل دهنده الیاف شیشه

Table 1 Percentage of elements constituting glass fibers

عنصر	درصد وزنی (%)
O	54.88
Mg	0.56
Al	7.00
Si	23.53
K	0.16
Ca	13.80
Ti	0.06
جمع کل	100.00

جدول 2 درصد عناصر تشکیل دهنده الیاف پلی فنیلین سولفید

Table 2 Percentage of elements constituting PPS fibers

عنصر	درصد وزنی (%)
C	78.30
S	21.70
جمع کل	100.00

با توجه به اطلاعات به دست آمده استحکام کششی نمونه تک جهته طولی تقریباً 5 برابر بیشتر از نمونه الیاف خرد شده است. در مورد استحکام برشی میان لایه ای نیز، نمونه تک جهته طولی حدود 3 برابر مقاوم تر از نمونه الیاف خرد شده می باشد. این اختلاف را می توان به پیوستگی مسیر بار در امتداد الیاف ممتد نسبت داد، به گونه ای که در نمونه طولی، بخش عمده بار در راستایی اعمال می شود که فاز تقویت کننده بیشترین کارایی را در تحمل و توزیع تنش در آن دارد. در مقابل، آرایش تک جهته الیاف، ضعف قابل توجهی در خواص مکانیکی در جهت عمود بر الیاف ایجاد می کند، زیرا در این جهت، خواص عمدتاً به ماتریس پلیمری بستگی دارد.

در نمونه های تقویت شده با الیاف کوتاه، مقادیر استحکام کششی در دو ضخامت 1 و 2 میلی متر (به ترتیب 56 ± 10 و 61 ± 10 مگاپاسکال) با در نظر گرفتن بازه انحراف معیار، از نظر آماری تفاوت معناداری نشان نمی دهند. این تطابق نشان دهنده آن است که رفتار مکانیکی ورق های الیاف کوتاه در این پژوهش، کاملاً مستقل از ضخامت بوده و توزیع تصادفی و کسر حجمی الیاف در فرآیند تولید، بدون ایجاد گرادپان های مخرب در ضخامت های بالاتر، به خوبی حفظ شده است

استحکام کششی پایین نمونه های الیاف کوتاه نشان می دهد که طول الیاف خرد شده احتمالاً از طول بحرانی انتقال بار کمتر است. در این شرایط، پیش از آنکه تنش در لیف به حد تسلیم برسد، لیف از درون ماتریس بیرون کشیده می شود

نکته دیگر قابل توجه در نتایج خواص مکانیکی ناهمسانگردی¹ بسیار قوی در نمونه های با الیاف ممتد تک جهته است. خواص مکانیکی در جهت موازی با الیاف (طولی) به مراتب برتر از خواص در جهت عمود بر الیاف (عرضی) می باشد. تفاوت فاحش بین استحکام برشی میان لایه ای در جهت طولی (18.7 مگا پاسکال) و عرضی (0.6 مگا پاسکال) نشان می دهد که مقاومت در برابر جدا شدن لایه ها به شدت وابسته به جهت گیری الیاف است. در جهت طولی، الیاف پیوسته با ایجاد پل های قوی بین لایه ها، مقاومت بالایی را ارائه می دهند و بار کششی از طریق تنش های برشی در فصل مشترک از ماتریس به الیاف منتقل می شود. در جهت طولی، الیاف پیوسته مانع از لغزش صفحات ماتریس روی یکدیگر می شوند و الیاف شیشه مانند مهارنده های میکروسکوپی از اشاعه ی ترک های برشی درون لایه ای جلوگیری می کنند. در مقابل، در جهت عرضی، مقاومت برشی بین لایه ها صرفاً به چسبندگی ماتریس پلی فنیلن سولفید محدود می شود که بسیار ضعیف تر است. این پدیده در طراحی قطعاتی که تحت بارگذاری برشی خارج از محور قرار می گیرند، اهمیت ویژه ای دارد که همین روند در استحکام کششی نیز مشاهده می شود. استحکام بسیار بالای نمونه طولی (289 مگا پاسکال) ناشی از تحمل بار مستقیم توسط الیاف پیوسته با مدول بالا است.

استحکام کششی بسیار پایین در جهت عرضی 1 ± 5 مگا پاسکال در مقایسه با استحکام ذاتی پلیمر پلی فنیلن سولفید خالص، حاکی از تغییر نقش الیاف شیشه از فاز تقویت کننده به نقص های ساختاری بحرانی است. در بارگذاری عرضی، به دلیل ضعف برهم کنش های فصل مشترک، سطح الیاف به عنوان سایت های جوانه زنی ترک عمل کرده و با ایجاد تمرکز تنش شدید در فصل مشترک، موجب گسیختگی زودرس و ترد ماتریس پیش از رسیدن به ظرفیت باربری واقعی آن می شوند. در این حالت، مقاومت برشی صرفاً تابع

گرماسنجی نظیر گرماسنجی روبشی تفاضلی است ولی باز آرایشی زنجیره های آمورف به ساختار منظم بلوری و تغییر در هدایت حرارتی نمونه و آزاد سازی انرژی تبلور احتمالاً باعث ایجاد نوسانی ناچیز در تعادل وزنی دستگاه شده است. بعد از بررسی های صورت گرفته، در جدول 3 خواص کامل الیاف ذکر شده است.

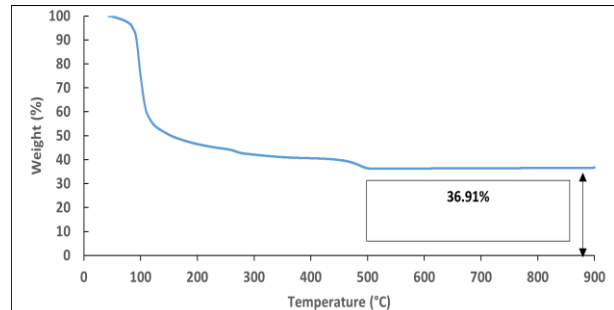


Fig. 13 TGA diagram of glass fiber/PPS Commingled fibers

شکل 13 نمودار آزمون گرماسنجی وزنی الیاف کامینگل الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

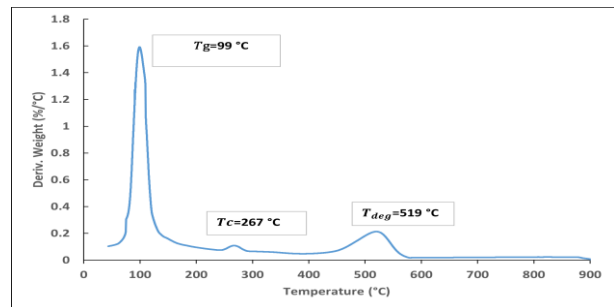


Fig. 14 Derivative of TGA diagram of glass fiber/PPS fiber Commingled fibers

شکل 14 مشتق نمودار آزمون گرماسنجی وزنی الیاف کامینگل الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

جدول 3 خواص الیاف کامینگل الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید

Table 3 Properties of glass fiber/PPS Commingled fibers

مقدار	شرح
1.79	دانسیته الیاف کامینگل شیشه/PPS ($\frac{g}{cm^3}$)
1700 ± 50	نمره نخ الیاف کامینگل شیشه/PPS (تکس)
0.95	مساحت سطح مقطع الیاف کامینگل شیشه/PPS (mm^2)

2-3- بررسی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی

نتایج آزمون های استحکام برشی میان لایه ای و استحکام کششی برای نمونه های کامپوزیتی با آرایش های مختلف الیاف در جدول 4 و 5 و همچنین شکل های 15 و 16 ارائه شده است. نتایج به دست آمده از آزمون های استحکام برشی میان لایه ای و استحکام کششی به وضوح نشان می دهند که آرایش الیاف نقش تعیین کننده ای در خواص مکانیکی کامپوزیت های الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید تولید شده به روش پرس گرم دارد و اهمیت آرایش و پیوستگی الیاف در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در کامپوزیت های الیاف شیشه/پلی فنیلن سولفید را تأیید می کند.

¹ Anisotropy

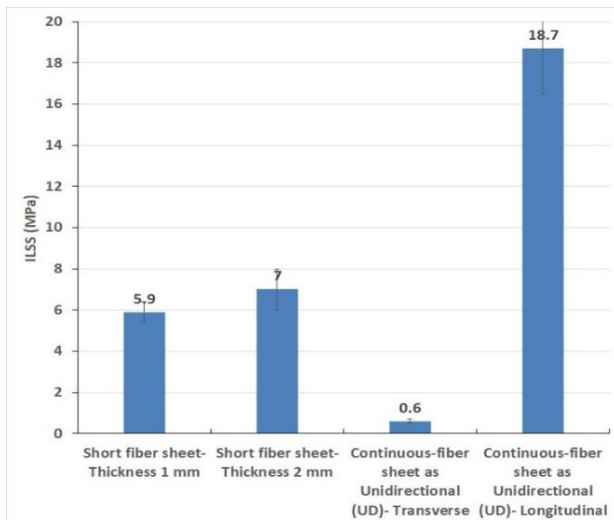


Fig. 15 Interlaminar shear strength (ILSS) test chart of PPS/Glass sheet

شکل 15 نمودار آزمون استحکام برشی میان لایه ای ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

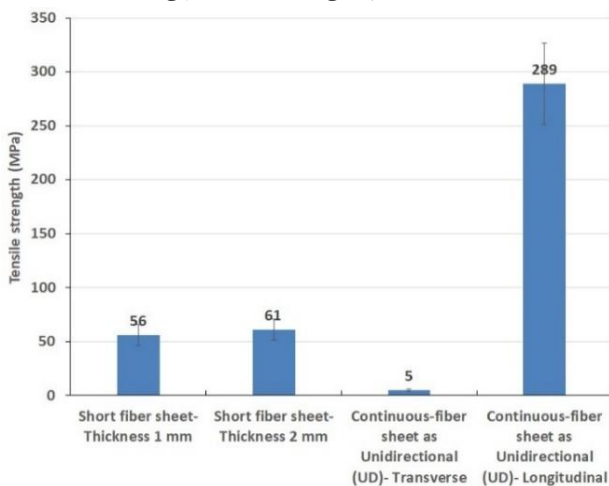


Fig. 16 PPS/Glass sheet tensile strength test chart

شکل 16 نمودار آزمون استحکام کششی ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

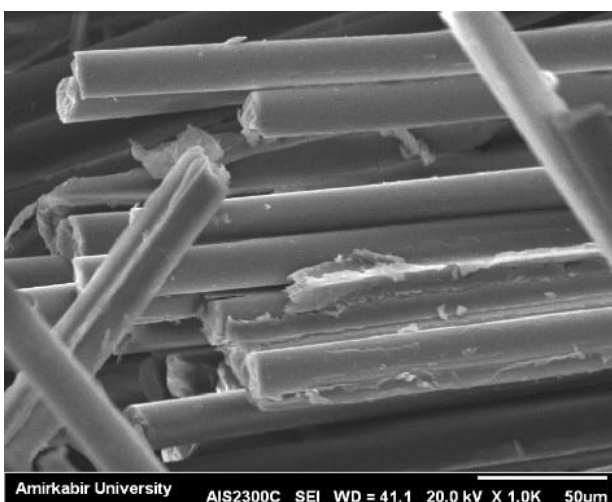


Fig. 17 SEM images of the cross-section of composite sheets produced with unidirectional fibers (magnification 450x)

شکل 17 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ورق های کامپوزیتی تولید شده با الیاف تک جهته (بزرگنمایی 450 برابر)

نیروهای ضعیف واندروالسی و قفل مکانیکی ناشی از انقباض حرارتی ماتریس حول الیاف در حین فرآیند سردسازی است.

اختلاف بالای خواص مکانیکی در جهت طولی نسبت به عرضی، ثابت می کند که در کامپوزیت پلی فنیلن سولفید/ شیشه، خواص مکانیکی یک «کمیت ساختاری و سازه ای» است تا یک «خاصیت ذاتی ماده». این تفاوت رفتاری همچنین حاکی از آن است که سازوکار غالب آسیب در جهت طولی و عرضی یکسان نیست؛ به گونه ای که در جهت طولی، مشارکت فاز تقویت کننده در باربری بیشتر است، در حالی که در جهت عرضی، نقش ماتریس و فصل مشترک در کنترل شروع و گسترش آسیب برجسته تر می شود.

نمونه های تقویت شده با الیاف کوتاه، خواص مکانیکی نسبتاً همسان گرد تری را از خود نشان می دهند. توزیع تصادفی الیاف در تمام جهات، منجر به رفتار مکانیکی مشابه در جهات مختلف می شود. با این حال، به دلیل طول محدود الیاف و عدم پیوستگی آن ها در سراسر ساختار، مقادیر استحکام برشی میان لایه ای و استحکام کششی در این نمونه ها به طور قابل توجهی پایین تر از مقادیر به دست آمده در جهت طولی نمونه های تک جهته است.

جدول 4 نتایج آزمون استحکام برشی میان لایه ای (استحکام برشی میان لایه ای) ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

Table 4 Interlaminar shear strength (ILSS) test results of PPS/Glass sheet

ردیف	نمونه	ارزیابی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی ILSS (MPa)
1	ورق الیاف ممتد تک جهته - طولی	18.7±2.2
2	ورق الیاف ممتد تک جهته - عرضی	0.6±0.1
3	ورق الیاف کوتاه ضخامت 2 میلی متر	7±1
4	ورق الیاف کوتاه ضخامت 1 میلی متر	5.9±0.5

جدول 5 نتایج آزمون استحکام کششی ورق پلی فنیلن سولفید/شیشه

Table 5 Tensile strength test results of PPS/Glass sheet

ردیف	نمونه	استحکام کششی (MPa)
1	ورق الیاف ممتد تک جهته - طولی	289±38
2	ورق الیاف ممتد تک جهته - عرضی	5±1
3	ورق الیاف کوتاه ضخامت 2 میلی متر	61±10
3	ورق الیاف کوتاه ضخامت 1 میلی متر	56±10

3-3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ورق های کامپوزیتی

بررسی سطوح شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، درک عمیق تری از سازوکارهای شکست و کیفیت فصل مشترک الیاف-زمینه پلیمری فراهم می کند. در نمونه های تک جهته (شکل 17)، بیرون کشیدگی الیاف به عنوان یک سازوکار اصلی شکست قابل مشاهده است. در حالی که در برخی نواحی، زمینه پلیمری به خوبی الیاف را احاطه کرده است، در نقاط دیگر شکاف ها و جدایی هایی در فصل مشترک دیده می شود که می تواند نشان دهنده چسبندگی غیرایده آل و تأثیرگذار بر خواص برشی باشد.

در نمونه های با الیاف کوتاه و تصادفی (شکل 18)، آرایش نامنظم الیاف در جهات مختلف مشهود است. کیفیت آغشتگی در این نمونه ها نیز متغیر به نظر می رسد و توزیع غیریکنواخت تراکم الیاف می تواند به ایجاد نقاط ضعف موضعی منجر شود.

- [2] Khan, M. I., Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., "Investigation Of Impact Properties Of Para-Aramid Composites Made With A Thermoplastic-Thermoset Blend," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 35, No. 8, pp. 1147-1165, 2021.
- [3] Pegoretti, A., "Recycling Concepts For Short-Fiber-Reinforced And Particle-Filled Thermoplastic Composites: A Review," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 93-104, 2021.
- [4] Koerdt, M., Brüning, H., Von Oesen, A., Herrmann, A. S., "Modelling And Analysis Of The Thermal Characteristic Of Thermoplastic Composites From Hybrid Textiles During Compression Moulding," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 35, No. 1, pp. 127-146, 2019.
- [5] Mallick, P. K., "Chapter 5 - Thermoplastics And Thermoplastic-Matrix Composites For Lightweight Automotive Structures," *Materials, Design And Manufacturing For Lightweight Vehicles*, Vol. 2, No. 1, pp. 187-228, 2021.
- [6] Ebadi Shishegaran, M., Mehri Khansari, N., Ghorbani, H., "Experimental And Numerical Investigation Of Interlayer Fracture Of Glass/PP Continuous Fiber Thermoplastic Composite In Mixed Mode (I/II)," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 3, pp. 2536-2545, 2025.
- [7] Patou, J., Baillleul, J. L., Delaunay, D., Le Louët, B., "Influence Of Consolidation Process On Voids And Mechanical Properties Of Powdered And Commingled Carbon/PPS Laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 117, No. 1, pp. 260-275, 2019.
- [8] Dadou, A. H., Golzar, M., Akbari, D., Mohamadipour, M. H., "Visualization Of Flow And Void In Pultrusion Process Of Thermoplastic Composites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 453-463, 2018.
- [9] Sattar, S., Nimal, A. S., Al-Ketan, O., Al-Rub, R. K. A., Liao, K., "Mechanical Behavior Of Long Discontinuous Glass Fiber Nylon Composite Produced By In-Situ Polymerization," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 154, No. 1, pp. 106779-106788, 2022.
- [10] Ono, M., Nakai, A., Ohtani, A., "Mechanical Properties Of Thermoplastic Composites Made Of Commingled Carbon Fiber/Nylon Fiber," *Polymers*, Vol. 13, No. 19, pp. 3206-3218, 2021.
- [11] Kravaev, P., Manke, M., Becker, M., Gries, T., "Influence Of Process Parameters On Filament Distribution And Blending Quality In Commingled Yarns Used For Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 27, No. 3, pp. 350-363, 2014.
- [12] Ueda, M., Ui, N., Ohtani, A., "Lightweight And Anti-Corrosive Fiber Reinforced Thermoplastic Rivet," *Composite Structures*, Vol. 188, No. 1, pp. 356-362, 2018.
- [13] Stolyarov, O., Seide, G., Gries, T., "15 - Commingled Composites," *Fiber Reinforced Composites*, Vol. 1, No. 1, pp. 439-460, 2021.
- [14] Ogale, V., Alagirusamy, R., "Properties Of GF/PP Commingled Yarn Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 21, No. 6, pp. 511-523, 2008.
- [15] Anil, A., Rama Prasad, V., Sudhakara, P., "Novel Eco-Friendly Commingled Polypropylene/Banana Fiber Composite: Studies On Thermal And Mechanical Properties," *Polymer Bulletin*, Vol. 73, No. 11, pp. 2987-3005, 2016.
- [16] Tomić, N., Putić, S., Pavlović, V., "Optimizing The Thermal Gradient And The Pulling Speed In A Thermoplastic Pultrusion Process Of PET/E Glass Fibers Using Finite Element Method," *Metallurgical & Materials Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 103-112, 2018.
- [17] Alagirusamy, R., Ogale, V., "Development And Characterization Of GF/PET, GF/Nylon, And GF/PP Commingled Yarns For Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 18, No. 3, pp. 269-285, 2005.
- [18] Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., Wang, C. H., "Glass Fiber Reinforced PPS Composites: Processing, Structure And Mechanical Properties," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 3, pp. 457-464, 2012.

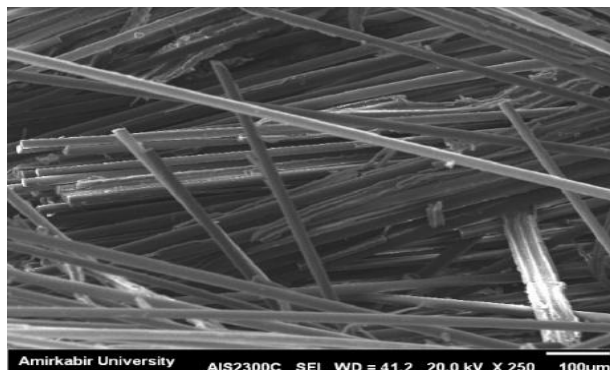


Fig. 18 SEM images of the cross-section of composite sheets produced with short random fibers (250x magnification)

شکل 18 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ورق های کامپوزیتی

تولید شده با الیاف کوتاه رندوم (بزرگنمایی 250 برابر)

4- نتیجه گیری

این مطالعه به طور نظام مند، تأثیر معماری الیاف را بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت های گرم انرم شیشه/پلی فنیل سولفید که با روش پرس گرم ساخته شده اند، مورد ارزیابی قرار داد. یافته های کلیدی، برتری قاطع کامپوزیت های تقویت شده با الیاف پیوسته و تک جهت را در کاربردهایی که تحت بارگذاری محوری قرار می گیرند، به اثبات رساند. این نمونه ها به دلیل پیوستگی ساختاری و انتقال بار کارآمد در طول الیاف، استحکام کششی و برشی میان لایه ای به مراتب بالاتری (به ترتیب حدود 5 و 3 برابر) نسبت به کامپوزیت های با الیاف کوتاه و آرایش تصادفی از خود نشان دادند.

با این حال، این عملکرد برتر به قیمت ایجاد ناهمسانگردی شدید در خواص تمام می شود؛ به طوری که مقاومت در جهت عمود بر الیاف به شدت کاهش می یابد. در مقابل، کامپوزیت های با الیاف خرد شده، خواص مکانیکی متعادل تر و همسانگردتری را ارائه می دهند که هرچند از نظر قدر مطلق ضعیف تر هستند، اما برای قطعات با هندسه پیچیده یا تحت بارگذاری های چندجهته، گزینه مناسب تری محسوب می شوند. تحلیل های میکروسکوپی نیز با آشکار ساختن سازوکارهای شکست متفاوت در دو ساختار، این مشاهدات ماکروسکوپی را تأیید نمود. در نهایت، این پژوهش نشان می دهد که انتخاب استراتژی تقویت (الیاف پیوسته در برابر خرد شده) یک تصمیم مهندسی حیاتی است که باید بر اساس درک دقیقی از شرایط بارگذاری و نیازهای کاربردی قطعه نهایی اتخاذ گردد و یک راه حل واحد برای تمام کاربردها وجود ندارد.

نتایج این مطالعه می تواند در صنایع پیشرفته نظیر هوافضا، خودرو، و تولید قطعات سازه ای که نیازمند طراحی دقیق آرایش الیاف هستند کاربرد داشته باشد. استفاده از نتایج حاضر می تواند بهینه سازی انتخاب نوع آرایش الیاف را بر اساس الزامات عملکردی و اقتصادی تسهیل کند. برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود اثر عامل های فرایندی دیگر نظیر دما و فشار پرس گرم، و نیز استفاده از انواع دیگر پلیمرهای گرم انرم در ترکیب با الیاف هیبریدی کامینگل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد.

5- مراجع

- [1] Bahrami Gh, M., Mosalmani, R., Shishehsaz, M., "Micromechanical Modeling Of Creep Behavior Of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite And Long-Fiber Reinforced Composites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 2479-2489, 2024.

- [19] Kim, H. S., Lee, B. H., Choi, S. W., "Mechanical Properties Of Short Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites," Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 5, pp. 1256-1261, 2008.
- [20] Mazur, R. L., Ferreira, M., Amico, S. C., "Processing And Mechanical Behavior Of Commingled Glass Fiber/Thermoplastic Composites," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 28, No. 9, pp. 1234-1248, 2015.



نشریه علمی پژوهشی
کامپوزیت
علوم و فناوری
<http://jstc.iust.ac.ir>



قالب پیش‌نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم‌افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول¹، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و ... نگارنده سوم³، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* شهر، صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

چکیده (سبک عنوان چکیده)

اطلاعات مقاله:

در این قالب (تمپلیت)، شیوه‌ی تهیه‌ی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرم‌افزار ورد برای مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها، به‌طور کامل در استایل‌ها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پیست) آن در بخش‌های مختلف و انتخاب استایل مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه شده باشند، معذور است. برای آماده‌سازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایل‌ها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگی‌های لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه می‌باشد. چکیده باید به‌طور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روش‌های انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکل‌ها، جدول‌ها، فرمول‌ها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:
Composites, Foam, Shear, Deflection

Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

کپی و سپس چسباندن (پیست²) متن خود در این فایل، سبک³ مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:

Paste option → match with Destination format

1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت¹) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

³ Style

¹ Template

² Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 4, pp. 2891-2894, 2026. <https://doi.org/...>

...

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند(توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن² با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین³) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه‌ی محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

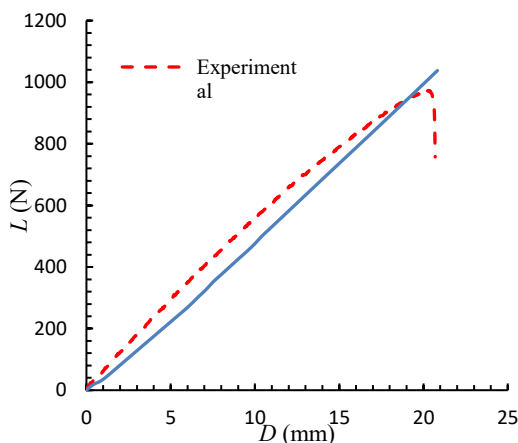


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی 5 میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، : ، ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,7,5].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی¹ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال 1.2 صحیح و 1/2 غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوتستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

1-2- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- به همه‌ی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سائز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

³ Gridlines

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
 - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
 - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
 - به همگی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
 - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
 - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
 - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
 - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.
- برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم	10	9
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها ⁽⁹⁾	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

⁽⁹⁾ فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث 9pt² و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدور برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ³ استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطرهای بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a \cdot b)$ به جای نقطه ضرب $(a * b)$ استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املا‌ی زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها» جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «اساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنوت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم‌علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست‌علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست‌علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علایم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε کرنش

بالانویس‌ها

k تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست‌علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم‌تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تأکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی‌ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.
- ✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.
- ✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote