

Comparative Study of FDM and FGF Additive Manufacturing Processes on Mechanical and Thermal Properties of ABS Nanocomposites Reinforced with Hybrid CNT-GO Nanomaterials

Sewara Mohsin Mahealdeen Shekhan¹, Mehran Mahboubkhah^{*1}, Reza Najjar²

¹ Mechanical Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Department of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: July 12, 2026

Revised: August 09, 2026

Accepted: September 06, 2026

ePublished: October 19, 2026

ABSTRACT

Hybrid carbon reinforcements provide an effective route to enhance the mechanical and thermal performance of thermoplastics used in extrusion-based additive manufacturing. In this study, acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) nanocomposites reinforced with hybrid carbon nanotube (CNT) and graphene oxide (GO) reinforcements were fabricated using fused deposition modeling (FDM) and fused granular fabrication (FGF). A dissolution-assisted mixing strategy was employed to improve nanofiller dispersion prior to extrusion. Mechanical properties (tensile and flexural), thermal behavior (differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis), chemical structure (Fourier transform infrared spectroscopy), and microstructure (field emission scanning electron microscopy) of the specimens were comprehensively investigated. The results showed that the balanced 0.15%CNT-0.15%GO composition increased the tensile modulus by 23% in FDM and 25% in FGF, while tensile strength improved by 15% and 27%, respectively. In flexural testing, the 0.1%CNT-0.2%GO composition fabricated via FGF exhibited the best performance, with 114% and 63% improvements in flexural modulus and flexural strength, respectively. Thermal analysis confirmed increases in glass transition temperature by up to 5.4°C and 5% weight loss temperature by up to 15°C in hybrid nanocomposites. Microstructural observations revealed uniform nanoparticle dispersion, reduced porosity, and crack deflection and bridging mechanisms in hybrid specimens. Although FDM provided higher absolute mechanical properties, FGF demonstrated more significant relative improvements, particularly in flexural properties. The findings indicate that the selection of fabrication method and optimal reinforcement ratio plays a decisive role in the reinforcement efficiency of hybrid reinforcements in additive manufacturing.

Keywords: Hybrid Carbon Reinforcement, Carbon Nanotube-Graphene Oxide, ABS, Fused Deposition Modeling, Fused Granular Fabrication, Additive Manufacturing, Mechanical properties, Thermal Stability.

How to cite this article

Mohsin Mahealdeen Shekhan S., Mahboubkhah M., Najjar R., Comparative Study of FDM and FGF Additive Manufacturing Processes on Mechanical and Thermal Properties of ABS Nanocomposites Reinforced with Hybrid CNT-GO Nanomaterials, Modares Mechanical Engineering; 2027;27(01):1-16.

*Corresponding author's email: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-0275-4837



Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Noncommercial terms.



بررسی تأثیر فرآیند ساخت افزایشی FDM و FGF بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های ABS تقویت‌شده با نانومواد هیبریدی CNT-GO

سواره محسن محی الدین شیخان^۱، مهران محبوب‌خواه^{۱*}، رضا نجار^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

نانوصفحات کربنی هیبریدی مسیری مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی و حرارتی ترموپلاستیک‌های مورد استفاده در ساخت افزایشی مبتنی بر اکستروژن فراهم می‌کنند. در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های آکریلونیتریل-بوتادین-استایرن (ABS) تقویت‌شده با افزودنی‌های هیبریدی نانولوله‌های کربنی (CNT) و اکسید گرافن (GO) با استفاده از دو روش رسوب‌گذاری مذاب با فیلامنت (FDM) و رسوب‌گذاری مذاب با گرانول (FGF) ساخته شدند. برای بهبود پراکندگی نانوصفحات پیش از اکستروژن، از راهکار اختلاط با کمک انحلال شیمیایی استفاده گردید. خواص مکانیکی (کشش و خمش)، رفتار حرارتی (گرماسنجی پویایی تفاضلی DSC و وزن‌سنجی گرمایی TGA)، ساختار شیمیایی (طیف‌سنجی فروسرخ FTIR) و ریزساختار (میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی FESEM) نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب متوازن 0.15% CNT/0.15% GO در آزمون کشش، مدول کشسانی را در FDM به میزان ۲۳٪ و در FGF به میزان ۲۵٪ افزایش داد. استحکام کششی نیز به ترتیب ۱۵٪ و ۲۷٪ بهبود یافت. در آزمون خمش، ترکیب 0.1% CNT/0.2% GO در فرآیند FGF با افزایش ۱۱۴٪ مدول خمشی و ۶۳٪ استحکام خمشی، بهترین عملکرد را نشان داد. تحلیل‌های حرارتی افزایش دمای انتقال شیشه‌ای تا ۵/۴ درجه سانتی‌گراد و افزایش دمای تخریب ۵٪ وزنی تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد را در نانوکامپوزیت‌ها تأیید کردند. تصاویر ریزساختاری نشان‌دهنده پراکندگی یکنواخت نانوذرات، کاهش تخلخل و مکانیزم‌های انحراف و پل‌زنی ترک در نمونه‌های هیبریدی بود. اگرچه FDM مقادیر مطلق بالاتری در خواص مکانیکی ارائه داد، FGF بهبودهای نسبی بیشتری به ویژه در خواص خمشی نشان داد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب روش ساخت و نسبت بهینه تقویت‌کننده‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی تقویت‌کنندگی پلیمرها در ساخت افزایشی دارند.

کلیدواژه‌ها: نانوتقویت‌کننده‌های کربنی هیبریدی، نانولوله‌های کربنی-اکسید گرافن، ABS، رسوب‌گذاری مذاب با فیلامنت، رسوب‌گذاری مذاب با گرانول، ساخت افزایشی، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷

نحوه ارجاع به این مقاله

محسن محی الدین شیخان سواره، محبوب‌خواه مهران، نجار رضا، بررسی تأثیر فرآیند ساخت افزایشی FDM و FGF بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های ABS تقویت‌شده با نانومواد هیبریدی CNT-GO، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۶-۱: ۱۴۰۵؛ ۲۷(۰۱).

* پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

* شناسه ارجید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۴۸۳۷-۰۲۷۵-۰۰۰۳-۰۰۰۰



۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) به عنوان یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تولید پیشرفته، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، تجهیزات پزشکی و تولید قطعات سفارشی به دست آورده است [۱]. برخلاف روش‌های سنتی تولید که عمدتاً مبتنی بر حذف ماده یا شکل‌دهی هستند، در ساخت افزایشی قطعه به صورت لایه‌به‌لایه و مستقیماً از مدل سه‌بعدی رایانه‌ای ساخته می‌شود. این ویژگی علاوه بر کاهش مصرف مواد اولیه، امکان تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده، کاهش زمان توسعه محصول و شخصی‌سازی قطعات را فراهم کرده است [۲].

در میان فناوری‌های مختلف ساخت افزایشی، فرآیندهای مبتنی بر اکستروژن مواد (Material Extrusion) به دلیل سادگی، هزینه پایین تجهیزات، قابلیت استفاده از طیف گسترده‌ای از پلیمرها و امکان تولید قطعات با ابعاد مختلف، بیشترین کاربرد را در صنعت و مراکز تحقیقاتی دارند [۳، ۴]. بر اساس استاندارد ASTM F2792، فرآیندهای رسوب‌گذاری مذاب با فیلامنت (Fused Deposition Modeling, FDM) و رسوب‌گذاری مذاب با گرانول (Fused Granular Fabrication, FGF) در این گروه قرار می‌گیرند. در فرآیند FDM، ماده اولیه به صورت فیلامنت وارد نازل شده و پس از ذوب، به صورت لایه‌ای روی بستر چاپ رسوب می‌کند. در مقابل، در فرآیند FGF ماده اولیه به صورت گرانول مستقیماً توسط اکسترودر پیچی ذوب و اکسترودمی‌شود و بنابراین مرحله تولید فیلامنت حذف می‌شود [۵، ۶].

فرآیند FDM طی دو دهه گذشته به دلیل دسترسی آسان به تجهیزات، کنترل مناسب کیفیت فیلامنت و تکرارپذیری مطلوب، بیشترین سهم را در تحقیقات مرتبط با چاپ سه‌بعدی پلیمرها به خود اختصاص داده است. با این حال، تولید فیلامنت نیازمند یک مرحله فرآوری اضافی است که علاوه بر افزایش هزینه و زمان، ممکن است موجب تخریب حرارتی پلیمر و کاهش کیفیت نهایی قطعات شود. از سوی دیگر، فرآیند FGF به دلیل استفاده مستقیم از گرانول‌های پلیمری، کاهش هزینه مواد اولیه، حذف مرحله تولید فیلامنت، افزایش نرخ تولید و امکان استفاده از مواد بازیافتی یا کامپوزیت‌های ویژه، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۷، ۸].

با وجود مزایای متعدد FGF، تفاوت مکانیزم تغذیه، شرایط ذوب، فشار اکستروژن و نحوه تشکیل لایه‌ها سبب می‌شود که رفتار مکانیکی و ریزساختار قطعات تولید شده با این روش با قطعات حاصل از FDM تفاوت داشته باشد. کیفیت اتصال بین لایه‌ها، میزان تخلخل داخلی، یکنواختی جریان مذاب، پایداری فشار اکستروژن و تاریخچه حرارتی ماده از جمله عواملی هستند که مستقیماً بر خواص نهایی قطعات تأثیر می‌گذارند [۹، ۱۰]. رفیعی و همکاران [۱۱] با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی برای

تولید نانوکامپوزیت‌های CNT/ABS با استفاده از روش تاگوچی نشان دادند که پارامترهایی نظیر دمای اکستروژن، سرعت چاپ و ضخامت لایه تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی نهایی دارند. خوانساری نبی و همکاران [۱۲] نیز در پژوهشی به بررسی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت Glass/ABS پرینت‌شده با روش نوین ترکیبی (FDM+Fiber) پرداختند و نشان دادند که اتصال بین لایه‌ها و کیفیت چسبندگی در فصل مشترک تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر استحکام نهایی و مکانیزم‌های شکست دارد. بنابراین، مقایسه مستقیم فرآیندهای FDM و FGF تحت شرایط یکسان چاپ، از دیدگاه علمی و صنعتی اهمیت زیادی دارد و می‌تواند در انتخاب فرآیند مناسب برای تولید قطعات مهندسی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا کند [۱۳].

پلیمر آکریلونیتریل-بوتادین-استایرن (ABS) یکی از پرکاربردترین پلیمرها در فرآیندهای اکستروژن ماده محسوب می‌شود. این پلیمر دارای استحکام کششی حدود ۴۰-۵۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته حدود ۲-۳ گیگاپاسکال، چقرمگی ضربه حدود ۲۰۰-۳۰۰ ژول بر متر و دمای انتقال شیشه‌ای حدود ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد است [۱۴، ۱۵]. با وجود این مزایا، استفاده از ABS در کاربردهای سازه‌ای با محدودیت‌هایی نیز همراه است. مدول الاستیسیته نسبتاً پایین این پلیمر در مقایسه با پلیمرهای مهندسی، حساسیت به رشد و گسترش ترک تحت بارگذاری‌های دینامیکی، مقاومت ناکافی در برابر خزش در دماهای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد و پایداری حرارتی متوسط (دمای تخریب حدود ۴۰۰-۴۲۰ درجه سانتی‌گراد) از جمله مهم‌ترین موانع استفاده از ABS در قطعات باربر و شرایط عملیاتی سخت محسوب می‌شود [۱۴-۱۶]. این محدودیت‌ها سبب شده است که پژوهشگران طی سال‌های اخیر به دنبال توسعه نانوکامپوزیت‌های ABS با استفاده از انواع نانوتقویت‌کننده‌های کربنی، سرامیکی و معدنی باشند تا بدون کاهش قابلیت چاپ، خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری آن را بهبود بخشند [۱۷، ۱۸].

در میان نانوتقویت‌کننده‌های مختلف، نانولوله‌های کربنی (CNT) و اکسید گرافن (GO) به دلیل استحکام ذاتی زیاد، سطح ویژه بالا و قابلیت ایجاد برهم‌کنش مؤثر با زمینه پلیمری، از مؤثرترین تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در نانوکامپوزیت‌های پلیمری محسوب می‌شوند [۱۹، ۲۰]. نانولوله‌های کربنی به دلیل ساختار یک‌بعدی، نسبت طول به قطر بسیار زیاد و استحکام کششی بالا، قادرند انتقال تنش را در زمینه پلیمری بهبود بخشیده و از رشد و گسترش ترک جلوگیری کنند [۲۱]. در مقابل، اکسید گرافن به عنوان یکی از مشتقات گرافن، دارای ساختار دولایه یا چندلایه با گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار نظیر هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل است. حضور این گروه‌های عاملی موجب افزایش انرژی سطحی، بهبود ترشوندگی و ایجاد برهم‌کنش‌های فیزیکی قوی با زنجیره‌های پلیمری می‌شود [۲۲، ۲۳].

در سال‌های اخیر، استفاده هم‌زمان از CNT و GO به عنوان نانوتقویت‌کننده هیبریدی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. جیوتی و همکاران [۲۴] در پژوهشی بر روی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی GO-CNT/ABS، اثر هم‌افزایی این دو نانوتقویت‌کننده را در بهبود خواص رئولوژیکی و فصل مشترک نشان دادند و گزارش کردند که حضور هم‌زمان GO و CNT موجب افزایش مدول الاستیک و کاهش نرخ تخریب حرارتی می‌شود. چن و همکاران [۲۵] نیز بهبود قابل‌توجهی در محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی و خواص دینامیکی-مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی GO-CNT/ABS مشاهده کردند. در این سامانه‌ها، صفحات اکسید گرافن می‌توانند از تجمع نانولوله‌های کربنی جلوگیری کرده و شرایط مناسبی برای توزیع یکنواخت آن‌ها در زمینه پلیمری فراهم کنند. از سوی دیگر، نانولوله‌های کربنی نیز با ایجاد پل‌های نانومقیاس بین صفحات گرافنی، مانع بازآرایی و تجمع مجدد صفحات GO می‌شوند. این برهم‌کنش متقابل موجب تشکیل یک شبکه سه‌بعدی پایدار در داخل زمینه پلیمری شده و انتقال تنش، توزیع کرنش و مقاومت در برابر رشد ترک را بهبود می‌بخشد. چنین اثر هم‌افزایی یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی در نسل جدید نانوکامپوزیت‌های مهندسی به شمار می‌رود [۲۴، ۲۵].

مرور پژوهش‌های منتشر شده طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مطالعات انجام‌شده بر نانوکامپوزیت‌های ABS، تنها به استفاده از یک نوع نانوتقویت‌کننده CNT یا GO به‌تنهایی محدود بوده است. شیخ و بهدینان [۲۶] و دال و همکاران [۲۷] عمدتاً بر تأثیر نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی و چاپ‌پذیری ABS متمرکز بوده‌اند و مطالعات محدودی به بررسی سیستم‌های هیبریدی CNT/GO در این زمینه پرداخته‌اند. اگرچه نتایج پژوهش‌های موجود نشان‌دهنده تأثیر مثبت هر یک از این نانوتقویت‌کننده‌ها است، اما مطالعات جامع درباره سیستم‌های هیبریدی CNT/GO، به‌ویژه در پلیمر ABS، هنوز محدود بوده و نتایج گزارش‌شده نیز در بسیاری از موارد به دلیل تفاوت در روش تهیه نانوکامپوزیت، نوع نانوتقویت‌کننده، درصد وزنی و شرایط فرآوری، قابل مقایسه نیستند [۲۸، ۲۹]. علاوه بر این، در بسیاری از مقالات تنها خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و ارتباط میان رفتار مکانیکی، رفتار حرارتی و ویژگی‌های ریزساختاری به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار نگرفته است [۳۰، ۳۱].

بر اساس مرور ادبیات فنی، سه خلأ پژوهشی اصلی در این حوزه قابل شناسایی است: (۱) عدم وجود مطالعه جامع بر روی سیستم‌های هیبریدی CNT/GO در پلیمر ABS برای فرآیندهای ساخت افزایشی، به‌ویژه در زمینه بررسی هم‌زمان خواص مکانیکی و حرارتی، (۲) محدود بودن تحقیقات در زمینه فرآیند FGF در مقایسه با FDM، به‌گونه‌ای که تأثیر مستقیم روش ساخت بر کارایی نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی هنوز به‌طور کامل روشن نشده است،

و (۳) عدم بررسی یکپارچه ارتباط میان رفتار مکانیکی، رفتار حرارتی و ویژگی‌های ریزساختاری در نانوکامپوزیت‌های چاپ‌شده. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عملکرد نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی تنها به نوع و مقدار آن‌ها محدود نمی‌شود، بلکه نحوه پراکنش در زمینه پلیمری، کیفیت فصل مشترک، تاریخچه حرارتی ماده در طول فرآوری، شرایط اکستروژن و کیفیت اتصال بین لایه‌های چاپ شده نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص نهایی ایفا می‌کنند [۳۲، ۳۳]. به همین دلیل، ارزیابی هم‌زمان خواص مکانیکی، رفتار حرارتی با آزمون‌های DSC و TGA و ریزساختار با FTIR و FESEM می‌تواند درک دقیق‌تری از مکانیزم‌های تقویت در نانوکامپوزیت‌های چاپ‌شده ارائه دهد. تلفیق این اطلاعات می‌تواند ارتباط میان ساختار، فرآیند و خواص را با دقت بیشتری تبیین کند [۳۴].

بر این اساس، در پژوهش حاضر نانوکامپوزیت‌های ABS تقویت‌شده با نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی نانولوله‌های کربنی چنددیواره و اکسید گرافن با استفاده از روش اختلاط محلولی تهیه شدند و پس از تولید گرانول، به دو روش ساخت افزایشی FDM و FGF مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور بررسی جامع عملکرد این نانوکامپوزیت‌ها، آزمون‌های کشش، خمش، آنالیزهای گرماسنجی پویایی تفاضلی (DSC) و وزن‌سنجی گرمای (TGA)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) انجام شد. نتایج حاصل از این آزمون‌ها به صورت تلفیقی مورد تحلیل قرار گرفت تا ارتباط میان فرآیند ساخت، ریزساختار، رفتار حرارتی و خواص مکانیکی مشخص شود. همچنین، بر اساس نتایج آزمون‌های DSC، TGA، FTIR و تصاویر FESEM، مکانیزم‌های تقویت نانوکامپوزیت‌های ABS تبیین و تفسیری علمی از رفتارهای مشاهده‌شده ارائه گردید.

نوآوری اصلی این پژوهش را می‌توان در سه محور زیر خلاصه کرد: ۱- مقایسه مستقیم دو فرآیند ساخت افزایشی FDM و FGF با استفاده از ترکیبات یکسان و شرایط چاپ مشابه، به‌گونه‌ای که امکان بررسی تأثیر خالص مسیر فرآیند بر خواص نهایی فراهم شود. ۲- استفاده از سامانه تقویت‌کننده هیبریدی CNT-GO با هدف بهره‌گیری از اثر هم‌افزایی میان نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی.

۳- ارزیابی هم‌زمان خواص مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و ریزساختاری به منظور ارائه یک تحلیل جامع از ارتباط فرآیند-ساختار-خواص در نانوکامپوزیت‌های ABS.

انتظار می‌رود نتایج این پژوهش علاوه بر توسعه دانش فنی در زمینه نانوکامپوزیت‌های پلیمری قابل چاپ، زمینه مناسبی برای طراحی و تولید قطعات مهندسی با عملکرد مکانیکی و حرارتی بهبودیافته در فناوری‌های نوین ساخت افزایشی در صنایع خودروسازی (قطعات داخلی و بدنه)، هوافضا (قطعات سبک با استحکام بالا) و تجهیزات پزشکی (قطعات سفارشی با مقاومت

جدول ۱ مشخصات فنی مواد اولیه شامل پلیمر ABS، نانولوله‌های کربنی چنددیواره و اکسید گرافن مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1 Specifications of the raw materials used in this study.

	ABS	GO	MWCNTs
Manufacturer	XTRUSION	US Research Nanomaterials	US Research Nanomaterials
Specifications	Extruder Temperature (190-220 °C) Density (1.24 g/cm ³)	Purity > 99.5% Thickness of plates (7 μm) Layers No (10)	Purity > 95% External diameter (30nm) Length (2 μm)

جدول ۲ ترکیب هیبریدی CNT-GO و درصد‌های وزنی کل تقویت‌کننده‌های مورد بررسی در این مطالعه

Table 2 CNT-GO hybrid composition and total weight percentages of the reinforcements investigated in this study.

Test No.	Printing Method	ABS (wt.%)	MWCNT (wt.%)	GO (wt.%)
1-2	FDM & FGF	100%	0	0
3-4	FDM & FGF	99.7%	0.15%	0.15%
5-6	FDM & FGF	99.7%	0.2%	0.1%
7-8	FDM & FGF	99.7%	0.1%	0.2%

مدت زمان اعمال امواج فراصوت بر اساس مرور منابع معتبری که در زمینه پراکندگی نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن در پلیمرها با استفاده از حلال استون گزارش شده‌اند، انتخاب گردید. سونی و همکاران [۳۲] نشان دادند که زمان فراصوت کمتر از ۲۰ دقیقه برای دستیابی به پراکندگی مطلوب نانولوله‌های کربنی کافی نبوده و زمان ۲۰ تا ۶۰ دقیقه منجر به پراکندگی مناسب همراه با ایجاد اتصالات و گره‌خوردگی‌های بین نانولوله‌ها می‌شود. همچنین در پژوهشی دیگر، زمان فراصوت ۳۰ دقیقه برای پراکندگی نانولوله‌های کربنی چنددیواره در استون به‌عنوان یکی از سطوح بهینه گزارش شده است. توان دستگاه (۴۰۰ وات) و فرکانس (۲۰ کیلوهرتز) نیز مطابق با تنظیمات رایج در منابع مشابه و مشخصات فنی دستگاه فراصوت مورد استفاده تنظیم شده است. متعاقباً، به منظور اطمینان از کارایی این زمان برای ترکیب و تجهیزیات خاص مورد استفاده در این پژوهش، آزمایش‌های اولیه با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام شد که پراکندگی مطلوب نانوذرات را در زمان ۳۰ دقیقه تأیید نمود. هم‌زمان با اعمال فراصوت، سوسپانسیون در حمام روغن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به آرامی حرارت داده شد تا فرآیند انحلال جزئی ABS و پراکندگی نانوصفحات تسریع گردد. پس از مرحله فراصوت، سوسپانسیون به یک سیستم همزن مکانیکی مجهز به همزن مغناطیسی با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه منتقل شد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا حلال استون به‌طور کامل تبخیر شده و مخلوطی همگن از پلیمر و نانوتقویت‌کننده‌ها حاصل شود. در نهایت، ماده حاصل (که به‌صورت توده‌های جامد بود) در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک شد تا هیچ

حرارتی مناسب) فراهم آورد. همچنین فرآیند FGF با حذف مرحله تولید فیلامنت و کاهش هزینه مواد اولیه، مزایای اقتصادی قابل‌توجهی نسبت به FDM ارائه می‌دهد که می‌تواند به تولید اقتصادی‌تر قطعات نانوکامپوزیتی در مقیاس صنعتی کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های ABS تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی چنددیواره، اکسیدگرافن و ترکیب هیبریدی آن‌ها به روش اختلاط محلولی تهیه شدند. نمونه‌های نهایی با استفاده از دو فرآیند ساخت افزایشی مبتنی بر اکستروژن، یعنی رسوب‌گذاری مذاب با فیلامنت (FDM) و رسوب‌گذاری مذاب با گرانول (FGF)، ساخته شدند. به منظور ارزیابی جامع خواص، آزمون‌های مکانیکی (کشش و خمش)، آنالیزهای حرارتی DSC و TGA، طیف‌سنجی فروسرخ و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی انجام گردید.

۲-۱- مواد اولیه

پلیمر پایه مورد استفاده در این پژوهش، ABS و ذرات تقویت‌کننده شامل، نانولوله‌های کربنی و اکسیدگرافن مطابق مشخصه‌های مطرح شده در جدول ۱ می‌باشد. حلال استون (با خلوص ۹۹/۸٪) نیز از شرکت Merck (آلمان) جهت انحلال شیمیایی ABS و اختلاط با نانوتقویت‌کننده‌ها استفاده شد. ترکیب‌های مختلف نانوکامپوزیت بر اساس درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن در جدول ۲ ارائه شده است. درصد‌های وزنی نانوپراکنددها بر اساس مرور سیستماتیک ادبیات فن و همچنین نتایج آزمون‌های مقدماتی (پایلوت) با درصد‌های وزنی ۰/۳، ۰/۵، ۰/۱۰ و ۱٪ انتخاب شدند که در آن‌ها، محدوده ۰/۳ بیشترین بهبود خواص مکانیکی را نشان داد. تمامی درصد‌های ذکرشده برای نانوتقویت‌کننده‌ها بر اساس درصد وزنی (wt.%) نسبت به وزن کل پلیمر ABS محاسبه شده‌اند.

۲-۲- آماده‌سازی نانوکامپوزیت‌ها به روش اختلاط محلولی

برای تهیه نانوکامپوزیت‌های ABS/CNT-GO، از روش اختلاط محلولی همراه با امواج فراصوت استفاده شد. ابتدا فیلامنت ABS به قطعات کوچک (گرانول) با اندازه تقریبی ۳-۵ میلی‌متر برش داده شد. سپس مقادیر مشخص‌شده از گرانول‌های ABS، پودر MWCNT و پودر GO مطابق با جدول ۲ با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین گردید. حلال استون با نسبت وزنی ۳:۱ (سه میلی‌لیتر استون به ازای هر یک گرم ABS) به مخلوط اضافه شد و سوسپانسیون حاصل تحت امواج فراصوت (Ultra-sonicator) با توان ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت.

فیلامنتی با کیفیت سطح مطلوب، قطر یکنواخت و بدون عیوب ظاهری بهینه‌سازی شدند.

فرآیند FDM: نمونه‌ها با استفاده از یک چاپگر سه‌بعدی FDM و با قطر نازل ۰/۸ میلی‌متر، دمای اکستروژن ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد، دمای بستر ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چاپ ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه ساخته شدند.

فرآیند FGF: در این روش، گرانول‌های نانوکامپوزیت به‌طور مستقیم و بدون مرحله تولید فیلامنت، به یک چاپگر سه‌بعدی مجهز به اکسترودر دانه‌ای (با ماریچ تغذیه) وارد شدند. قطر نازل این دستگاه ۰/۸ میلی‌متر، دمای اکستروژن ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد، دمای بستر ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چاپ ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم گردید.

پارامترهای چاپ بر اساس شرایط بهینه‌سازی شده در پژوهش‌های پیشین و همچنین آزمایش‌های مقدماتی برای دستیابی به بهترین کیفیت چاپ و عدم وجود عیوب ظاهری (مانند تاب، جدایش لایه‌ها و اکستروژن ناقص) انتخاب شدند [۱۱، ۱۳]. دمای اکستروژن (۲۳۰ درجه سانتی‌گراد) و دمای بستر (۶۰ درجه سانتی‌گراد) در محدوده توصیه‌شده توسط سازنده فیلامنت و منابع معتبر قرار دارند [۱۴، ۱۵]. سرعت چاپ (۱۵ میلی‌متر بر ثانیه)، ارتفاع لایه (۰/۳ میلی‌متر)، الگوی پرکننده ($\pm 45^\circ$ درجه) و درصد پرشدگی (۱۰۰٪) نیز بر اساس مطالعات قبلی که نشان داده‌اند این پارامترها منجر به خواص مکانیکی مطلوبی در قطعات چاپ‌شده با ABS می‌شوند، تنظیم گردیدند. همچنین، جهت مقایسه دقیق تأثیر مسیر فرآیند FDM در برابر FGF بر خواص نهایی، کلیه پارامترهای چاپی در هر دو فرآیند به‌صورت یکسان تنظیم شدند.

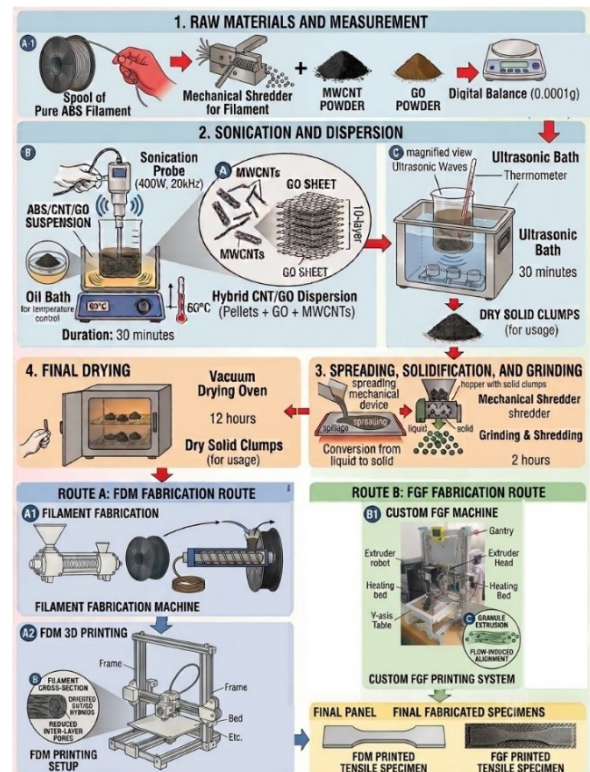
۲-۴- آزمون‌های مکانیکی (کشش و خمش)

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته‌شده، آزمون‌های کشش و خمش سه‌نقطه‌ای به‌ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D638 و ASTM D790 انجام شدند. مشخصه‌های ابعادی قطعات به ترتیب زیر است:

- آزمون کشش: نمونه‌های آزمون مطابق با استاندارد ASTM D638، نوع IV با ابعاد: طول کلی ۱۱۵ میلی‌متر، طول بخش مفید ۳۳ میلی‌متر، عرض بخش مفید ۶ میلی‌متر، ضخامت ۳/۲ میلی‌متر، شعاع گوشه‌ها ۱۴ میلی‌متر و فاصله بین گیره‌ها ۶۵ میلی‌متر.

- آزمون خمش: نمونه‌های آزمون مطابق با استاندارد ASTM D790 با ابعاد: طول ۷۵ میلی‌متر، عرض ۱۲/۷ میلی‌متر، ضخامت ۳/۲ میلی‌متر و فاصله بین دو تکیه‌گاه ۵۱/۲ میلی‌متر.

آزمون کشش با نرخ کرنش ۵ میلی‌متر بر دقیقه و آزمون خمش با نرخ جابجایی ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای هر ترکیب ماده و هر روش ساخت، حداقل ۳ نمونه ($n=3$) مورد آزمون قرار گرفت تا تکرارپذیری نتایج تضمین گردد. مقادیر گزارش‌شده در بخش نتایج، میانگین این سه اندازه‌گیری همراه با انحراف معیار هستند.



شکل ۱ نمای شماتیک از فرایند ساخت نانوکامپوزیت حاوی CNT/GO و روش‌های ساخت افزایشی

Fig. 1 Schematic representation: CNT/GO ABS nanocomposite fabrication & Additive manufacturing routes

گونه حلال باقی‌مانده‌ای در ساختار نهایی وجود نداشته باشد. گرانول‌های نانوکامپوزیت حاصل، برای هر دو فرآیند FDM و FGF مورد استفاده قرار گرفتند. شماتیکی از مراحل آماده‌سازی فوق‌الذکر در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- فرآیند ساخت افزایشی (FDM و FGF)

به منظور ساخت نمونه‌های نهایی برای آزمون‌های مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری، از دو دستگاه ساخت افزایشی مبتنی بر اکستروژن استفاده شد (شکل ۱):

ساخت فیلامنت قابل چاپ: گرانول‌های نانوکامپوزیت تهیه‌شده در مرحله قبل، ابتدا با استفاده از یک اکسترودر تک‌ماریچ دست‌ساز (Homemade) به فیلامنت با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر تبدیل شدند. دمای اکسترودر بر اساس آزمایش‌های اولیه تنظیم گردید؛ بدین صورت که فرآیند از دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد آغاز شد و با توجه به اینکه دمای پایین باعث افزایش فشار وارده بر موتور و اکسترودر می‌شد، دما به تدریج افزایش یافت تا به دمای نهایی ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد رسید که در آن امکان اکسترودر روان فیلامنت فراهم گردید. سرعت چرخش ماریچ (۱۰ دور بر دقیقه) و سرعت کشش فیلامنت با استفاده از سیستم کشش کنترل‌شده به‌گونه‌ای تنظیم شد که قطر نهایی فیلامنت در محدوده 1.75 ± 0.05 میلی‌متر حفظ گردد. این پارامترها بر اساس آزمایش‌های مقدماتی برای دستیابی به

تصاویر FESEM به منظور بررسی تأثیر نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی CNT-GO و روش ساخت (FDM و FGF) بر خواص نهایی نانوکامپوزیت‌های ABS ارائه و تفسیر می‌شوند. کلیه نتایج به صورت میانگین سه نمونه همراه با انحراف معیار گزارش شده‌اند.

۳-۱- خواص مکانیکی کششی

منحنی‌های تنش-کرنش کششی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته‌شده با دو روش FDM و FGF در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. مؤلفه‌های اصلی مستخرج از این منحنی‌ها شامل مدول کشسانی، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول تا شکست در شکل‌های ۴ تا ۶ خلاصه شده‌اند.

مدول کشسانی (شکل ۴): در نمونه‌های FDM، مدول کشسانی از ۱/۶۳ گیگاپاسکال ABS خالص به ۲ گیگاپاسکال برای ترکیب متوازن 0.15%GO/0.15%CNT افزایش یافت (۲۳٪). ترکیب 0.2%CNT/0.1%GO و 0.1%CNT/0.2%GO به ترتیب افزایش ۱۰ و ۶ درصدی نشان دادند. در نمونه‌های FGF، ترکیب متوازن با مدول ۱/۸۸ گیگاپاسکال، افزایش ۲۵ درصدی را به همراه داشت و ترکیبات دیگر بهبود ۱۷ و ۸ درصدی را نشان دادند. این افزایش مدول ناشی از استحکام ذاتی بالای نانوصفحات، تشکیل شبکه نانومقیاس و بهبود چسبندگی فصل مشترک از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی بین GO و ABS است. درصد بهبود مدول در FGF ۲۵٪ (اندکی بیشتر از) FDM ۲۳٪ است که به پراکندگی یکنواخت‌تر در فرآیند اکستروژن دانه‌ای نسبت داده می‌شود، هرچند مقادیر مطلق مدول در FDM بالاتر است [۳۰، ۲۹].

استحکام کششی نهایی (شکل ۵): در FDM، ترکیب متوازن با استحکام ۳۷/۸ مگاپاسکال، افزایش ۱۵ درصدی را نسبت به ABS خالص (۳۳) نشان داد. ترکیب 0.1%CNT/0.2%GO افزایش ۲ درصدی و ترکیب 0.2%CNT/0.1%GO کاهش ۵ درصدی را به همراه داشت. در FGF، ترکیب متوازن با استحکام ۳۰/۸ مگاپاسکال، بیشترین افزایش (۲۷٪) را نسبت به ABS خالص (۲۴/۲) نشان داد. بهبود استحکام ناشی از انتقال تنش مؤثر از زمینه به نانوپرکننده‌ها، مکانیزم‌های انحراف و پل زنی ترک است. عملکرد برتر FGF در درصد بهبود ۲۷٪ در مقابل ۱۵٪ روش FDM نشان‌دهنده پراکندگی بهتر نانوذرات در این فرآیند است [۲۵، ۲۴].

ازدیاد طول تا شکست (شکل ۶): در نمونه‌های FDM تغییرات جزئی بود (کمتر از ۵٪). در نمونه‌های FGF، ترکیب متوازن با افزایش ۱۲٪ همراه بود که رفتاری غیرمنتظره و حائز اهمیت است. این پدیده به پراکندگی یکنواخت نانوذرات، نقش گروه‌های عاملی GO در تسهیل لغزش زنجیره‌ها و ساختار یکپارچه‌تر FGF نسبت داده می‌شود [۲۶، ۲۷]. در مقابل، ترکیب 0.1%CNT/0.2%GO در FGF با کاهش ۲۶٪ مواجه شد که ناشی از تشکیل آگلومره‌های GO و کاهش شکل‌پذیری است.

آزمایش‌های مکانیکی با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال دو ستونه (مدل STM-50، ساخت شرکت اسپیکوتک، ایران) انجام شد. این دستگاه مجهز به سلول بار با دقت کلاس ۰/۵ و ظرفیت نامی ۵۰ کیلونیوتن بوده و مجهز به موتور سروو AC با قابلیت کنترل سرعت حرکت فک در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است. به منظور اندازه‌گیری دقیق کرنش (Strain) در طول آزمایش، از یک اکستنسومتر تماسی با طول گیج ۵۰ میلی‌متر با دقت کلاس ۰/۵ (مطابق با استاندارد ASTM E83) استفاده گردید. داده‌های نیرو و تغییر طول نمونه به صورت همزمان و با نرخ نمونه‌برداری بالا توسط نرم‌افزار اختصاصی دستگاه ثبت شده و منحنی تنش-کرنش بر اساس آن‌ها ترسیم گردید. آزمون‌ها طبق استاندارد ASTM D638 با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت.

۲-۵- آنالیزهای حرارتی (DSC و TGA)

رفتار حرارتی نمونه‌ها با استفاده از دو روش گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) و وزنسنجی گرمایی (TGA) مورد بررسی قرار گرفت. • آزمون DSC: این آزمون با استفاده از دستگاه DSC مدل (TA Instruments Q2000) انجام شد. نمونه‌ها به وزن تقریبی ۵-۱۰ میلی‌گرم در بوته‌های آلومینیومی مهر و موم شده و تحت اتمسفر نیتروژن با نرخ جریان ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، از دمای ۶۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه گرمایش داده شدند. دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) به عنوان نقطه میانی (Midpoint) تغییر ظرفیت گرمایی ویژه (ΔC_p) از روی منحنی‌های حرارت‌سنجی استخراج گردید.

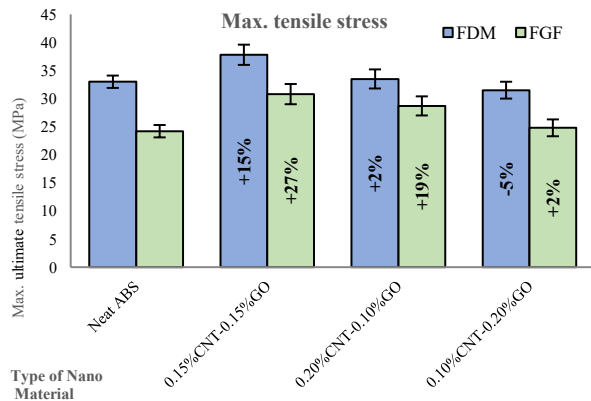
• آزمون TGA: این آزمون با استفاده از دستگاه TGA مدل (TA Instruments Q500) انجام شد. نمونه‌ها به وزن تقریبی ۱۰-۱۵ میلی‌گرم در بوته‌های آلومینایی تحت اتمسفر نیتروژن با نرخ جریان ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، از دمای محیط تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه حرارت داده شدند. از منحنی‌های کاهش وزن، سه پارامتر اصلی شامل دمای تخریب ۵٪ ($T_d5\%$)، دمای حداکثر نرخ تخریب (T_{dmax}) و درصد باقیمانده کربنی (Char yield) در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد استخراج گردیدند.

۲-۶- مشخصه‌یابی ریزساختاری و شیمیایی (FESEM و FTIR)

نانوتقویت‌کننده‌ها و زمینه پلیمری، از دستگاه طیف‌سنج فرسرخ مدل (Bruker Tensor 27) در محدوده عدد موجی ۴۰۰۰ تا ۴۰۰ cm^{-1} استفاده شد. به منظور بررسی ریزساختار، کیفیت پراکنش نانوذرات و مکانیزم‌های شکست، از تصاویر FESEM از سطوح شکست نمونه‌های کششی میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل (T-SCAN) استفاده شد.

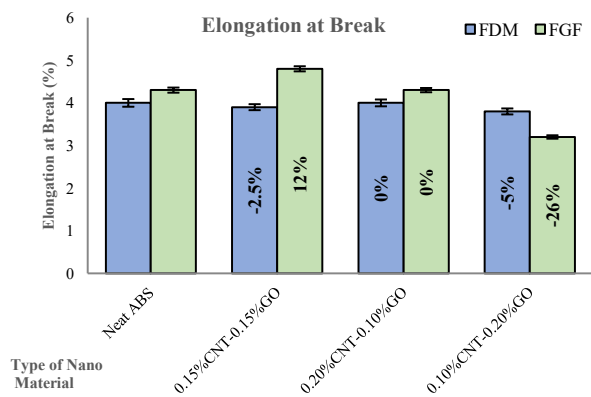
۳- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی (کشش و خمش)، تحلیل‌های حرارتی (DSC و TGA)، طیف‌سنجی FTIR و



شکل ۵ مقایسه استحکام کششی نهایی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

Fig. 5 Comparison of ultimate tensile strength of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF



شکل ۶ مقایسه ازدیاد طول تا شکست ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

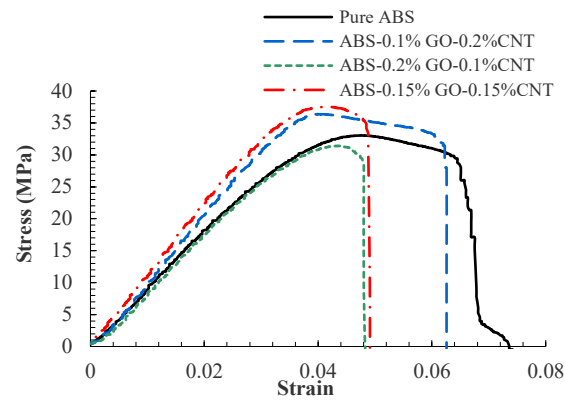
Fig. 6 Comparison of elongation at break of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF

به‌طور کلی، ترکیب متوازن 0.2% CNT/0.1% GO بهترین عملکرد را در هر دو فرآیند دارد. فرآیند FGF درصد بهبود بیشتری را نشان می‌دهد، در حالی که FDM مقادیر مطلق بالاتری ارائه می‌دهد. این نتایج در محدوده گزارش شده برای نانوکامپوزیت‌های مشابه قرار دارد [۲۷، ۲۵].

۲-۳- خواص مکانیکی خمشی

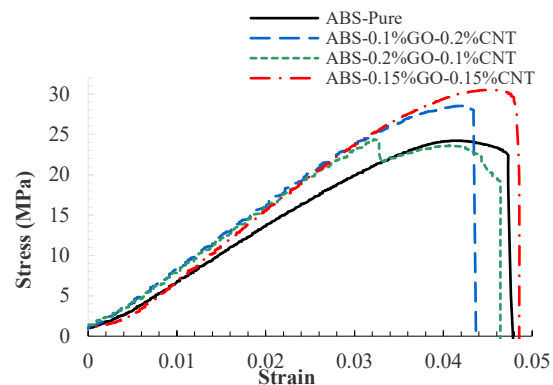
منحنی‌های تنش-کرنش خمشی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با دو روش FDM و FGF به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. مؤلفه‌های اصلی مستخرج از این منحنی‌ها شامل مدول خمشی، استحکام خمشی حداکثر و جابجایی خمشی تا شکست در شکل‌های ۹ تا ۱۱ خلاصه شده‌اند.

مدول خمشی (شکل ۹): بیشترین افزایش در نمونه‌های FGF برای ترکیب 0.1% CNT/0.2% GO با افزایش ۱۱۴ درصدی (از ۱/۴ به ۳ گیگاپاسکال) ثبت شد. ترکیب متوازن در FGF افزایش ۵۷ درصدی (به ۲/۲ گیگاپاسکال) و ترکیب 0.2% CNT/0.1% GO کاهش ۱۴ درصدی نشان داد. در FDM، ترکیب 0.2% CNT/0.1% GO



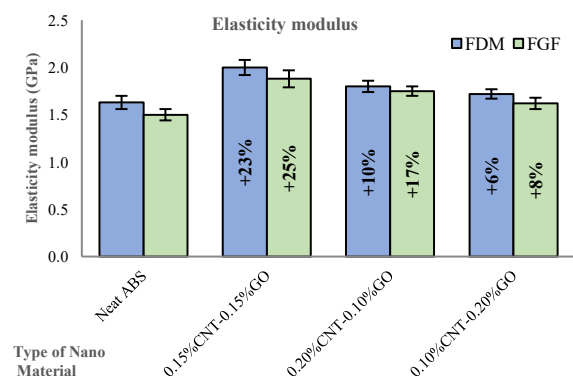
شکل ۲ منحنی‌های تنش-کرنش کششی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با روش رسوب‌گذاری مذاب با فیلامنت (FDM)

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via fused deposition modeling (FDM)



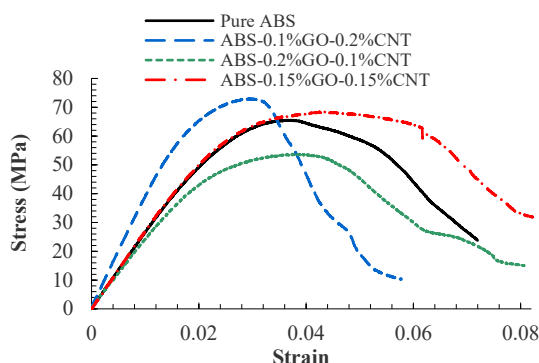
شکل ۳ منحنی‌های تنش-کرنش کششی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با روش رسوب‌گذاری مذاب با گرانول (FGF)

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via fused granular fabrication (FGF)



شکل ۴ مقایسه مدول کشسانی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

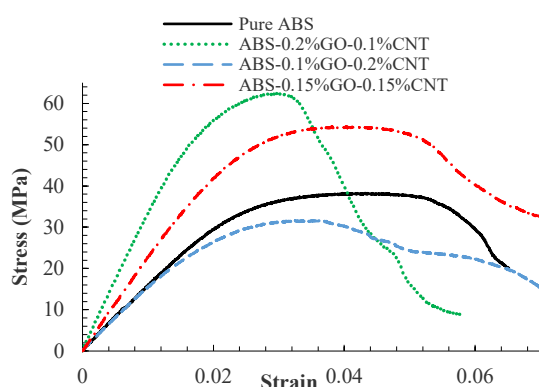
Fig. 4 Comparison of tensile modulus of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF



شکل ۷ منحنی‌های تنش-کرنش خمشی خالص و نانوکامپوزیت‌های

هیبریدی ساخته‌شده با روش رسوب‌گذاری مذاب با فیلامنت (FDM)

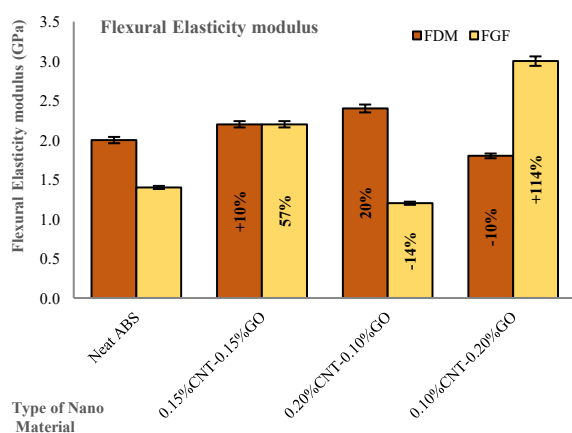
Fig. 7 Flexural stress-strain curves of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via fused deposition modeling (FDM)



شکل ۸ منحنی‌های تنش-کرنش خمشی خالص و نانوکامپوزیت‌های

هیبریدی ساخته‌شده با روش رسوب‌گذاری مذاب با گرانول (FGF)

Fig. 8 Flexural stress-strain curves of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via fused granular fabrication (FGF)



شکل ۹ مقایسه مدول خمشی خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی

ساخته‌شده با FDM و FGF

Fig. 9 Comparison of flexural modulus of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF

افزایش ۲۰ درصدی (از ۲ به ۲/۴ گیگاپاسکال) بهترین عملکرد را داشت. عملکرد برتر ترکیب با GO بیشتر در FGF نشان می‌دهد که در بارگذاری خمشی، گروه‌های عاملی اکسیژن دار GO نقش مؤثرتری در بهبود چسبندگی فصل مشترک ایفا می‌کنند. کاهش مدول در ترکیب ۰.۲٪CNT/۰.۱٪GO در FGF به تجمع نانولوله‌ها و ایجاد نقاط تمرکز تنش نسبت داده می‌شود که در بارگذاری خمشی تأثیر مخرب‌تری دارد. تفاوت چشمگیر بهبود مدول خمشی در FGF ۱۱۴٪ نسبت به FDM ۲۰٪ نشان‌دهنده کارایی بسیار بالاتر نانوتقویت‌کننده‌ها در فرآیند اکستروژن FGF است [۱۳، ۲۳].

- استحکام خمشی (شکل ۱۰): در FGF، ترکیب ۰.۱٪CNT/۰.۲٪GO با استحکام ۶۲ مگاپاسکال، افزایش ۶۳ درصدی را نسبت به ABS خالص (۳۸ مگاپاسکال) نشان داد. ترکیب متوازن نیز افزایش ۴۲ درصدی (به ۵۴ مگاپاسکال) داشت. در FDM، ترکیب متوازن با استحکام ۶۸ مگاپاسکال، افزایش ۵ درصدی و ترکیب ۰.۲٪CNT/۰.۱٪GO با استحکام ۷۳ مگاپاسکال، افزایش ۱۲ درصدی را نشان دادند. افزایش چشمگیر استحکام خمشی در FGF ۶۳٪ نسبت به FDM ۱۲٪ مؤید این است که در بارگذاری خمشی، کیفیت اتصال بین‌لایه‌ای و یکپارچگی ساختار نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. در FGF، حذف مرحله تولید فیلامنت موجب پراکندگی یکنواخت‌تر نانوذرات و تشکیل شبکه نانومقیاس مؤثرتر می‌شود [۲۴، ۲۵].

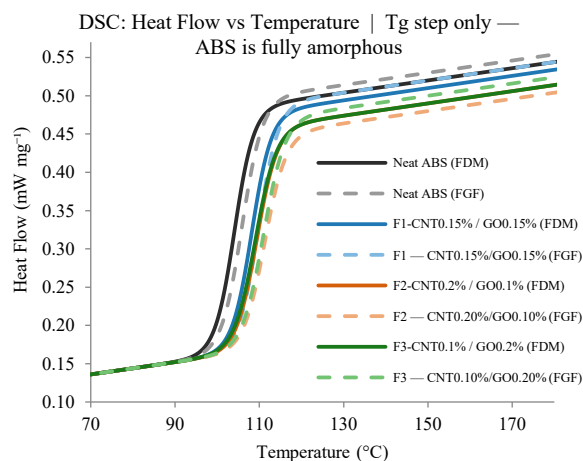
- جابجایی خمشی تا شکست (شکل ۱۱): در FGF، تمامی ترکیبات کاهش جابجایی داشتند (۱۸- تا ۳۰- درصد). بیشترین کاهش مربوط به ترکیب ۰.۱٪CNT/۰.۲٪GO با ۳۰٪ بود که با افزایش سفتی در این ترکیب همخوانی دارد. در FDM، ترکیب متوازن با افزایش ۹ درصدی (از ۳/۵ به ۳/۸ میلی‌متر) همراه بود که نشان‌دهنده بهبود چقرمگی است. رفتار متفاوت جابجایی خمشی در دو فرآیند به تأثیر مرزهای بین‌لایه‌ای بر مکانیزم‌های شکست نسبت داده می‌شود. در FDM، مرزهای بین‌لایه‌ای با ایجاد مسیرهای انحراف ترک به افزایش جابجایی کمک می‌کنند، در حالی که در FGF، ساختار یکپارچه‌تر منجر به شکست تردتر و جابجایی کمتر می‌شود [۲۶].

به‌طور کلی، خواص خمشی در FGF بهبودهای نسبی بسیار بیشتری نسبت به FDM نشان دادند. ترکیب ۰.۱٪CNT/۰.۲٪G در FGF با افزایش ۱۱۴ درصدی مدول و ۶۳ درصدی استحکام، بهترین عملکرد را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده نقش مؤثر GO در بهبود چسبندگی فصل مشترک و پراکندگی نانوصفحات است. در مقابل، ترکیب با درصد CNT بالاتر به دلیل تجمع نانولوله‌ها، عملکرد ضعیف‌تری داشت. با وجود بهبودهای نسبی چشمگیر در FGF، همچنان مقادیر مطلق بالاتری را در استحکام خمشی ارائه می‌دهد [۲۵، ۲۷].

جدول ۳ نتایج تحلیل‌های DSC و TGA برای ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی شامل دمای انتقال شیشه‌ای (Tg)، دمای تخریب ۵٪ وزنی (Td5%)، دمای حداکثر تخریب (Tdmax) و بازمانده کربنی

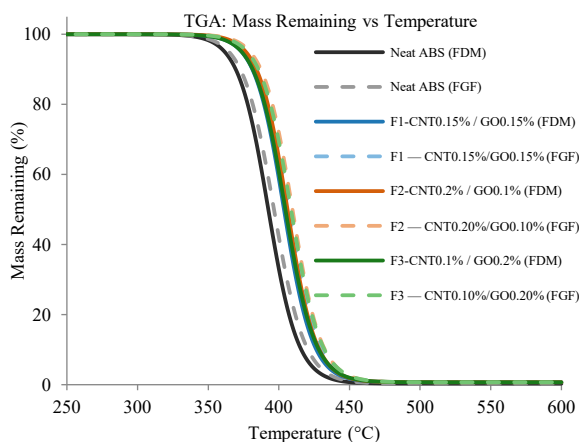
Table 3 DSC and TGA analysis results for neat ABS and hybrid nanocomposites including glass transition temperature (Tg), 5% weight loss temperature (Td5%), maximum degradation temperature (Tdmax), and char yield

Formulation	Method	Td5% °C	Tdmax °C	Char yield %	Tg onset °C	Tg midpoint (°C)	Tg end (°C)	ΔCp (J/g·°C)
Neat ABS	FDM	356	419	0.3	99.9	104.1	109.1	0.32
Neat ABS	FGF	359	424	0.3	101.2	105.9	110.9	0.33
CNT0.15%/GO0.15%	FDM	368	429	0.7	103.9	108.2	113.2	0.31
CNT0.15%/GO0.15%	FGF	371	433	0.7	105.4	109.8	114.8	0.32
CNT0.20%/GO0.10%	FDM	371	431	0.7	104.4	109.4	114.1	0.29
CNT0.20%/GO0.10%	FGF	374	435	0.7	106.2	111.3	116.2	0.28
CNT0.10%/GO0.20%	FDM	368	431	0.7	104.6	109.1	114.6	0.29
CNT0.10%/GO0.20%	FGF	372	435	0.7	106.1	111	116.3	0.3



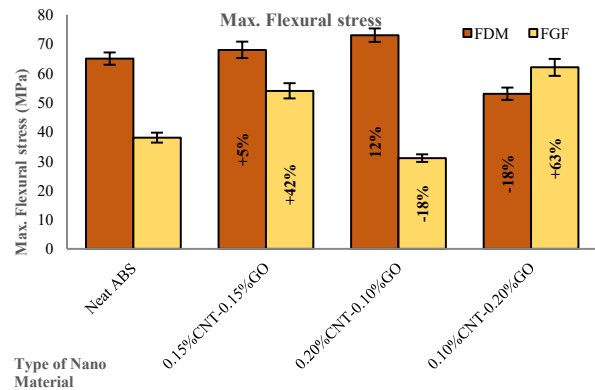
شکل ۱۲ منحنی‌های DSC (شار گرمایی برحسب دما) برای ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

Fig. 12 DSC curves (heat flow vs. temperature) of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF



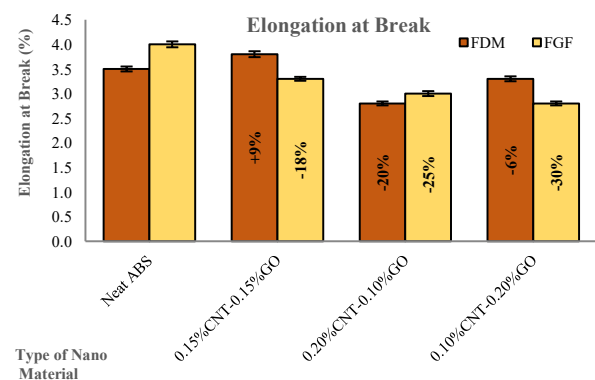
شکل ۱۳ منحنی‌های TGA (کاهش وزن برحسب دما) برای ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

Fig. 13 TGA curves (weight loss vs. temperature) of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF



شکل ۱۰ مقایسه ماکزیمم استحکام خمشی ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

Fig. 10 Comparison of maximum flexural strength of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF



شکل ۱۱ مقایسه جابجایی خمشی تا شکست ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با FDM و FGF

Fig. 11 Comparison of flexural displacement at break of neat ABS and hybrid nanocomposites fabricated via FDM and FGF

۳-۳-۳ تحلیل حرارتی DSC و TGA

منحنی‌های آزمون‌های DSC و TGA به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده و نتایج آنها در جدول ۳ خلاصه شده است. این نتایج اطلاعات ارزشمندی درباره تأثیر نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی و روش ساخت بر رفتار حرارتی نانوکامپوزیت‌ها ارائه می‌دهند.

۳-۳-۱-۱ تحلیل DSC

دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) برای ABS خالص در نمونه‌های FDM و FGF به ترتیب ۱۰۴/۱ و ۱۰۵/۹ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. با افزودن نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی، Tg به طور قابل توجهی افزایش یافت. بیشترین افزایش Tg برای ترکیب CNT0.20%/GO0.10% در نمونه FGF با مقدار ۱۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که نسبت به ABS خالص حدود ۵/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش را نشان می‌دهد.

توسط CNT و GO، با ایجاد مسیرهای پیچیده و طولانی‌تر برای انتشار گرما، تخریب پلیمر را به تأخیر می‌اندازد.

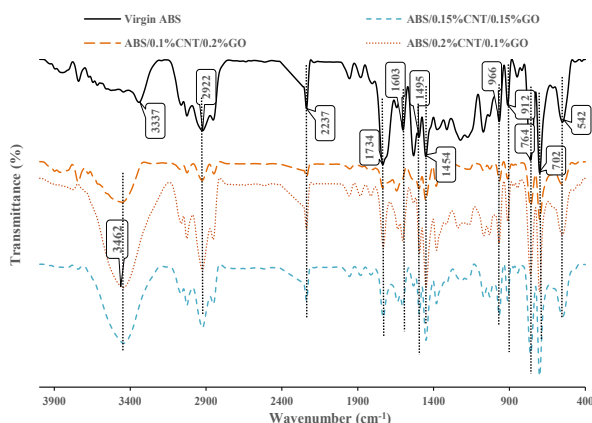
(۳) برهم‌کنش با رادیکال‌های آزاد: گروه‌های عاملی GO می‌توانند با رادیکال‌های آزاد حاصل از تخریب پلیمر برهم‌کنش کرده و سرعت واکنش‌های زنجیره‌ای تخریب را کاهش دهند.

چن و همکاران [۲۴] نیز در مطالعه خود بر روی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی GO-CNT/ABS، افزایش پایداری حرارتی را به اثر سدکنندگی نانوصفحات و تشکیل شبکه نانومقیاس نسبت دادند. جیوتی و همکاران [۲۳] نیز افزایش دمای تخریب و بازمانده کربنی را در نانوکامپوزیت‌های ABS تقویت‌شده با GO-CNT گزارش کردند و آن را به پراکندگی یکنواخت نانوصفحات و بهبود چسبندگی فصل مشترک مرتبط دانستند. شیخ و بهدینان [۲۵] نیز در مطالعه خود نشان دادند که حضور نانولوله‌های کربنی در ماتریس ABS موجب افزایش پایداری حرارتی و کاهش نرخ تخریب می‌شود.

مشابه نتایج DSC، نمونه‌های FGF پایداری گرمایی بهتری نسبت به نمونه‌های FDM با همان ترکیب نشان دادند که می‌تواند به دلیل ساختار یکنواخت‌تر، کاهش تخلخل و پراکندگی بهتر نانوذرات در این نمونه‌ها باشد. این موضوع با تصاویر FESEM (بخش ۳-۵) که ساختار یکنواخت‌تر و کاهش مرزهای بین‌لایه‌ای را در نمونه‌های FGF نشان داد، همخوانی دارد. به‌طور کلی، نتایج حرارتی نشان می‌دهد که استفاده از نانوپرکننده‌های هیبریدی CNT/GO و فرآیند FGF می‌تواند به‌طور هم‌زمان موجب افزایش دمای انتقال شیشه‌ای و بهبود پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های ABS شود.

۳-۳- تحلیل طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌های FTIR، ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های ABS/CNT-GO و باند‌های جذبی مشخصه و تغییرات آن‌ها در شکل ۱۴ و جدول ۴ خلاصه شده‌اند.



شکل ۱۴ طیف‌های فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های ABS/CNT-GO ساخته‌شده با روش‌های FDM و FGF

Fig. 14 FTIR spectra of neat ABS and ABS/CNT-GO nanocomposites fabricated by FDM and FGF

این افزایش Tg را می‌توان به عوامل زیر نسبت داد:

(۱) محدودیت حرکت زنجیره‌های پلیمری در نتیجه برهم‌کنش‌های فیزیکی (پیوند هیدروژنی و نیروهای واندروالسی) بین نانوصفحات و زنجیره‌های ABS، (۲) تشکیل شبکه نانومقیاس سه‌بعدی که فضای آزاد بین زنجیره‌ها را کاهش داده و انرژی لازم برای حرکت زنجیره‌ها را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. جیوتی و همکاران [۲۳] نیز در بررسی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی GO-CNT/ABS گزارش کردند که حضور هم‌زمان نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن موجب افزایش Tg به دلیل محدودیت حرکت زنجیره‌های پلیمری می‌شود. همچنین شیخ و بهدینان [۲۵] در مطالعه خود بر روی نانوکامپوزیت‌های ABS-CNT ساخته‌شده به روش افزایشی، افزایش Tg را به برهم‌کنش‌های فیزیکی بین نانولوله‌ها و زنجیره‌های پلیمری نسبت دادند.

همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های FGF مقادیر Tg بالاتری نسبت به نمونه‌های FDM با همان ترکیب دارند. این تفاوت را می‌توان به پراکندگی یکنواخت‌تر نانوذرات در فرآیند FGF نسبت داد که ناشی از حذف مرحله تولید فیلامنت و کاهش تنش‌های حرارتی و برشی اضافی است. دال و همکاران [۲۶] نیز نشان دادند که روش ساخت و تاریخچه حرارتی ماده تأثیر مستقیمی بر کیفیت پراکندگی نانوذرات و در نتیجه بر خواص حرارتی نهایی دارد.

۳-۳-۲- تحلیل TGA

دمای تخریب ۵٪ وزنی (Td5%) برای ABS خالص در نمونه‌های FDM و FGF به ترتیب ۳۵۶ و ۳۵۹ درجه سانتی‌گراد بود. با افزودن نانوتقویت‌کننده‌ها، Td5% به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و برای ترکیب CNT0.20%/GO0.10% در نمونه FGF به ۳۷۴ درجه سانتی‌گراد رسید که نشان‌دهنده افزایش حدود ۱۵ درجه‌ای است. دمای حداکثر تخریب (Tdmax) نیز از حدود ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد در ABS خالص به حدود ۴۳۰-۴۳۵ درجه سانتی‌گراد در نانوکامپوزیت‌ها افزایش یافت. بازمانده کربنی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز از ۰/۳٪ برای ABS خالص به ۰/۷٪ برای نانوکامپوزیت‌ها افزایش یافت که مستقیماً به حضور نانوصفحات کربنی در ماتریس پلیمری نسبت داده می‌شود.

این افزایش پایداری گرمایی را می‌توان به عوامل زیر مرتبط دانست: (۱) اثر سدکنندگی نانوصفحات: نانوصفحات CNT و GO به‌عنوان سدهای فیزیکی در برابر خروج محصولات تخریب عمل کرده و نرخ انتشار گازهای حاصل از تخریب پلیمر را کاهش می‌دهند، (۲) اثر عایق‌بودن GO و افزایش مسیر انتشار گرما: گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار GO باعث می‌شوند که این نانوصفحات به‌عنوان عایق‌های حرارتی عمل کرده و مقاومت گرمایی زمینه پلیمری را افزایش دهند. همچنین شبکه نانومقیاس سه‌بعدی تشکیل‌شده

جدول ۴ باندهای جذبی مشخصه طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) برای ABS خالص و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی همراه با عدد موج، اختصاص باند، تغییرات مشاهده‌شده و تفسیر مربوطه

Table 4 Characteristic FTIR absorption bands for neat ABS and hybrid nanocomposites with wavenumber, band assignment, observed changes, and corresponding interpretation

Wave no. (cm ⁻¹)	Band assignment	Virgin ABS	ABS/CNT-GO nanocomposites	Interpretation
3400–3500	O–H stretching (GO hydroxyl groups)	Very weak/absent	Increased intensity	Indicates oxygen-containing groups from GO; possible hydrogen bonding with nitrile groups
3025–3080	Aromatic C–H stretching (styrene)	Present	No shift	Styrene ring preserved after processing
2920–2850	Aliphatic C–H stretching (–CH ₂ , –CH ₃)	Strong	Slight intensity variation	Polymer backbone integrity maintained
2235–2240	C≡N stretching (acrylonitrile group)	Sharp peak	No shift; slight intensity change	No chemical degradation; suggests physical interfacial interaction [29,30]
1600–1630	Aromatic C=C stretching / GO sp ² carbon	Present	Slight broadening	Overlapping contribution from GO skeletal vibration; confirms nanofiller incorporation
1490–1500	Aromatic ring stretching	Present	No shift	ABS chemical structure preserved
966	Butadiene =C–H bending	Present	No significant change	Rubber phase unaffected by reinforcements
750–760	Aromatic C–H out-of-plane bending	Present	No shift	No covalent modification of styrene rings

طیف‌های FTIR تأیید می‌کنند که هیچ پیوند شیمیایی جدیدی در طی تهیه نانوکامپوزیت یا فرآیندهای FDM و FGF تشکیل نشده است. مهم‌ترین تغییرات مشاهده‌شده عبارتند از:

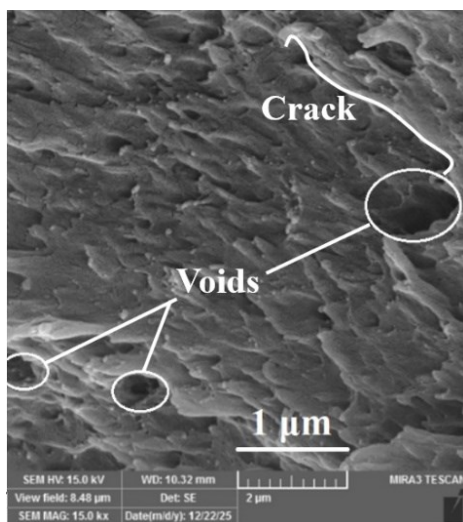
– افزایش شدت باند cm^{-1} ۳۴۰۰–۳۵۰۰: این افزایش شدت در نانوکامپوزیت‌ها، به ویژه در نمونه‌های با درصد GO بالاتر (ترکیب ۰.۱% GO/۰.۲% CNT، نشان‌دهنده حضور گروه‌های هیدروکسیل GO و احتمال تشکیل پیوند هیدروژنی با گروه‌های نیتریل ABS است. این برهم‌کنش‌های فیزیکی نقش مهمی در بهبود چسبندگی فصل مشترک و انتقال تنش ایفا می‌کنند.

– پهن شدگی جزئی باند cm^{-1} ۱۶۰۰–۱۶۳۰: این پدیده ناشی از همپوشانی باند کشش C=C آروماتیک ABS با ارتعاش اسکلت کربنی GO است که حضور نانوصفحات GO را در زمینه پلیمری تأیید می‌کند.

– عدم تغییر در موقعیت پیک‌ها: ثابت ماندن عدد موج پیک‌های اصلی (به ویژه باند cm^{-1} ۲۲۳۵–۲۲۴۰ مربوط به گروه نیتریل) نشان‌دهنده عدم تخریب شیمیایی ABS در طی فرآیند انحلال، اکستروژن و چاپ است و تأیید می‌کند که تقویت عمدتاً از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی (نه پیوند کووالانسی) صورت گرفته است. نتایج FTIR با یافته‌های مکانیکی و حرارتی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که بهبود خواص ناشی از چسبندگی فصل مشترک، درهم‌قفل شدگی مکانیکی و تشکیل شبکه نانومقیاس است.

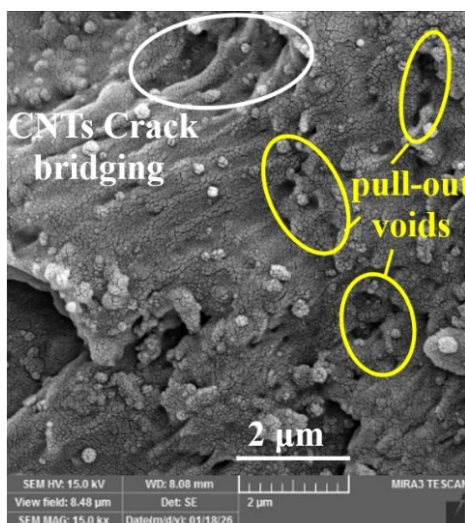
۳-۴- تحلیل میکروسکوپ الکترونی FESEM

در این بخش تصاویر میکروسکوپ الکترونی FESEM از مقطع شکست نمونه‌های چاپ شده آزمون کشش در شکل ۱۵ نشان داده شده و تفسیر آن‌ها نیز بیان شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانوذرات به‌طور نسبتاً یکنواخت در زمینه ABS پراکنده شده‌اند. تصاویر FESEM نمونه‌های هیبریدی CNT/GO، حضور مکانیسم‌های پل‌زنی ترک و انحراف ترک را تأیید کردند. نانولوله‌های کربنی باعث ایجاد پل بین ترک‌ها شده و صفحات GO مسیر شکست را منحرف کردند، که منجر به افزایش همزمان استحکام و چقرمگی نمونه‌ها گردید. همچنین در نمونه‌های با درصد بالای تقویت‌کننده، تجمع موضعی نانوذرات مشاهده شد که می‌تواند به کاهش خواص مکانیکی در مقایسه با نمونه‌های بهینه منجر شود.



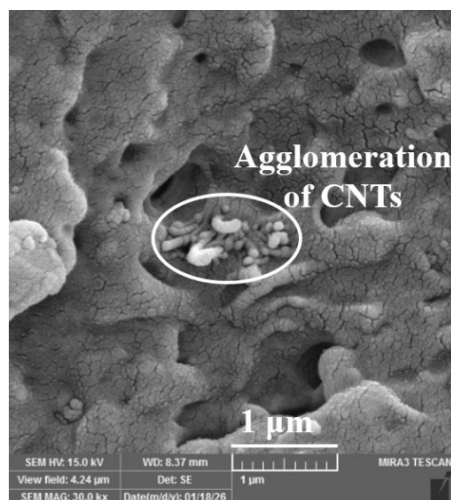
(الف) مقطع شکست ABS بدون افزودنی

(a) Fracture surface of neat ABS



(ب) مقطع شکست ABS با افزودنی ۰.۱۵% CNT/۰.۱۵% GO

(b) Fracture surface of ABS nanocomposite reinforced with 0.15% CNT/0.15% GO



(و) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.2%CNT/0.1%GO

(f) Fracture surface of ABS nanocomposite reinforced with 0.2%CNT/0.1%GO

شکل ۱۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) از سطوح شکست نمونه‌های کششی

Fig. 15 FESEM micrographs of fracture surfaces of tensile specimens

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های ABS تقویت‌شده با نانوصفحات هیبریدی CNT-GO با استفاده از روش اختلاط محلولی تهیه شده و با دو فرآیند ساخت افزایشی FDM و FGF ساخته شدند. خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری نمونه‌ها به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت و ارتباط بین فرآیند ساخت، ساختار و خواص تبیین گردید. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش به شرح زیر است:

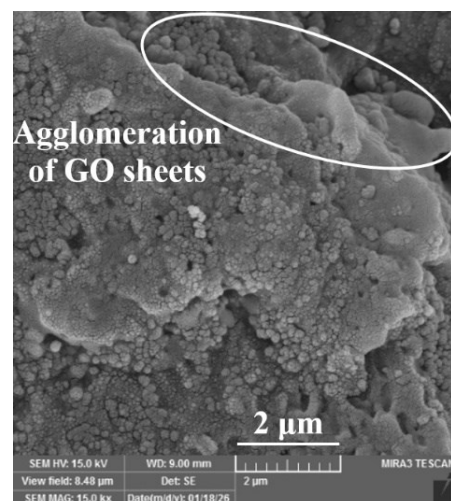
الف- اثر نانو تقویت‌کننده‌های هیبریدی: افزودن نانوصفحات هیبریدی CNT-GO به ABS موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و حرارتی شد. ترکیب متوازن 0.15%CNT/0.15%GO بهترین عملکرد کلی را در هر دو فرآیند نشان داد. در آزمون کشش، این ترکیب مدول کشسانی را در FDM به میزان ۲۳٪ و در FGF به میزان ۲۵٪ افزایش داد. استحکام کششی نیز به ترتیب ۱۵٪ و ۲۷٪ بهبود یافت. در آزمون خمش، ترکیب 0.2%GO/0.1%CNT در فرآیند FGF با افزایش ۱۱۴ درصدی مدول خمشی و ۶۳ درصدی استحکام خمشی، بهترین عملکرد را در میان تمامی ترکیبات به خود اختصاص داد. این نتایج نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی قابل‌توجه نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن در بهبود خواص مکانیکی است.

ب- تأثیر روش ساخت بر عملکرد مکانیکی: مقایسه دو فرآیند FDM و FGF نشان داد که اگرچه FDM به دلیل پایداری بیشتر جریان مذاب، کاهش تخلخل و ساختار متراکم‌تر، مقادیر مطلق بالاتری در خواص کششی و خمشی ارائه می‌دهد، اما FGF بهبودهای نسبی چشمگیرتری را در اثر افزودن نانو تقویت‌کننده‌ها نشان می‌دهد. این تفاوت به ساختار یکنواخت‌تر، کاهش مرزهای بین‌لایه‌ای و پراکندگی بهتر نانوذرات در فرآیند FGF نسبت داده



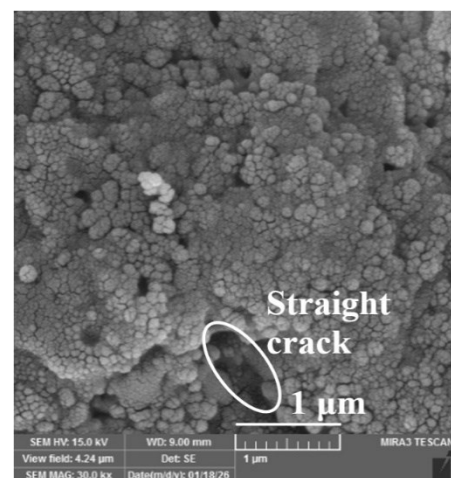
(ج) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.15%CNT/0.15%GO

(c) Fracture surface of ABS nanocomposite reinforced with 0.15%CNT/0.15%GO



(د) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.1%CNT/0.2%GO

(d) Fracture surface of ABS nanocomposite reinforced with 0.1%CNT/0.2%GO



(ه) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.1%CNT/0.2%GO

(e) Fracture surface of ABS nanocomposite reinforced with 0.1%CNT/0.2%GO

می‌شود. نکته قابل توجه اینکه ترکیب متوازن در فرآیند FGF نه تنها استحکام و مدول را افزایش داد، بلکه ازدیاد طول تا شکست را نیز به میزان ۱۲٪ بهبود بخشید.

ج- رفتار حرارتی: تحلیل‌های DSC و TGA نشان داد که حضور نانوصفات هیبریدی موجب افزایش دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) به میزان تا ۵/۴ درجه سانتی‌گراد، افزایش دمای تخریب ۵٪ (Td5%) به میزان تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد و افزایش بازمانده کربنی از ۰/۳٪ به ۰/۷٪ می‌شود. این بهبودها ناشی از محدودیت حرکت زنجیره‌های پلیمری توسط نانوصفات و اثر سدکنندگی آن‌ها در برابر خروج محصولات تخریب است. نمونه‌های FGF پایداری گرمایی بهتری نسبت به نمونه‌های FDM نشان دادند که به ساختار یکنواخت‌تر و پراکندگی بهتر نانوذرات در این فرآیند مرتبط است. د- برهم‌کنش‌های فصل مشترک: طیف‌های FTIR تأیید کردند که هیچ پیوند شیمیایی جدیدی در طی فرآیندهای تهیه و ساخت تشکیل نشده است و تقویت عمدتاً از طریق برهم‌کنش‌های فیزیکی (پیوند هیدروژنی بین گروه‌های اکسیژن‌دار GO و گروه‌های نیتریل ABS صورت گرفته است. این برهم‌کنش‌ها نقش کلیدی در بهبود چسبندگی فصل مشترک و انتقال تنش ایفا می‌کنند.

ه- مکانیزم‌های تقویت: تصاویر FESEM نشان داد که نانوکامپوزیت‌های هیبریدی دارای سطوح شکست زبرتر، ریزحفره‌های بیشتر و ساختارهای فیبریلی طویل‌شده‌ای هستند که حاکی از مکانیزم‌های انحراف ترک، پل زنی ترک توسط نانولوله‌ها و تشکیل شبکه نانومقیاس در زمینه پلیمری است. نمونه‌های FGF دارای ساختار یکنواخت‌تر، مرزهای بین‌لایه‌ای کمتر، تخلخل کمتر و پراکندگی بهتر نانوذرات بودند که با بهبودهای نسبی بالاتر در خواص مکانیکی همخوانی داشت.

و- نسبت بهینه تقویت‌کننده‌ها: نتایج نشان داد که نسبت ۱:۱ CNT/GO (ترکیب متوازن ۰/۱۵٪ از هر کدام) بهترین تعادل را بین افزایش خواص مکانیکی و حفظ شکل‌پذیری ایجاد می‌کند. ترکیبات با CNT بیشتر ۰.۱٪/GO تا ۰.۲٪/CNT، به دلیل تمایل به تجمع نانولوله‌ها، به ویژه در بارگذاری خمشی عملکرد ضعیف‌تری داشتند. ترکیبات با GO بیشتر ۰.۲٪/GO تا ۰.۱٪/CNT نیز در آزمون کششی عملکرد مناسبی نداشته و حتی در FDM باعث کاهش استحکام شدند، هرچند در خمش به ویژه در FGF بهترین عملکرد را نشان دادند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن به عنوان نانوتقویت‌کننده‌های هیبریدی، همراه با انتخاب مناسب روش ساخت FDM یا FGF بر اساس نوع کاربرد، می‌تواند مسیری مؤثر برای توسعه نانوکامپوزیت‌های ABS با خواص مکانیکی و حرارتی بهبودیافته در کاربردهای ساخت افزایشی فراهم آورد. فرآیند FGF با وجود مقادیر مطلق پایین‌تر، به دلیل بهبودهای نسبی چشمگیرتر، پایداری

حرارتی بهتر و حذف مرحله تولید فیلامنت، گزینه‌ای جذاب برای تولید انبوه قطعات نانوکامپوزیتی با عملکرد بالا محسوب می‌شود. از سوی دیگر، FDM به دلیل مقادیر مطلق بالاتر، برای کاربردهایی که نیازمند استحکام نهایی بالاتری هستند، همچنان گزینه مناسبی باقی می‌ماند. یافته‌های این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که نسبت بهینه تقویت‌کننده‌ها به نوع بارگذاری (کششی یا خمشی) و روش ساخت وابسته است و نمی‌توان یک ترکیب واحد را برای تمامی کاربردها توصیه کرد. این موضوع اهمیت بررسی هم‌زمان خواص مختلف و شرایط فرآیند را در طراحی مواد مرکب برای ساخت افزایشی آشکار می‌سازد.

بیانیه هوش مصنوعی: شکل‌های شماتیک ۱ و ۲ این مقاله با کمک ابزار هوش مصنوعی Gemini توسعه‌یافته توسط Google طراحی شده‌اند. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری‌های مقاله توسط نویسندگان انجام شده و نویسندگان مسئولیت کامل صحت و دقت مطالب را بر عهده دارند.

تقدیر و تشکر: از تمام کسانی که در انجام این رساله و بدست آوردن نتایج تجربی مقاله به نحوی تاثیرگذار بوده‌اند تقدیر و تشکر می‌گردد. **حامی مالی:** این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش نویسندگان: نویسنده اول [سواره محسن محی الدین شیخان] ایده‌پردازی و تدوین اهداف و پرسش‌های اصلی تحقیق، طراحی روش‌شناسی و توسعه مدل‌های مورد نظر، اجرای عملی پژوهش و انجام آزمایش‌ها/جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها با به‌کارگیری روش‌های آماری و محاسباتی، نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله، و همچنین تهیه و ترسیم تصاویر، نمودارها و نمایش گرافیکی داده‌ها.

نویسنده دوم (نویسنده مسئول) [مهران محبوب‌خواه]: نظارت و هدایت کلی بر فرآیند پژوهش و راهنمایی علمی به‌عنوان ناظر اصلی، مشارکت اساسی در ایده‌پردازی و شکل‌دهی به اهداف تحقیق، همکاری در طراحی روش‌شناسی، بازبینی انتقادی و ویرایش اساسی محتوای مقاله، مدیریت و هماهنگی اجرای رساله و همچنین تأمین منابع مالی مورد نیاز برای انجام پژوهش.

نویسنده سوم [رضا نجار]: نظارت حمایتی و ارائه راهنمایی‌های علمی تکمیلی در طول انجام تحقیق، اعتبارسنجی و تأیید صحت داده‌ها و بازتولیدپذیری نتایج، بازبینی انتقادی و ویرایش مقاله.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- Manuf. Process., vol. 37, pp. 339-347, 2019, doi: [10.1016/j.jmapro.2018.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.004).
- [15] T.H. Le, V.S. Le, Q.K. Dang, M.T. Nguyen, T.K. Le, and N.T. Bui, "Microstructure evaluation and thermal-mechanical properties of ABS/MWCNT filaments," Appl. Sci., vol. 11, no. 19, 8798, 2021, doi: [10.3390/app11198798](https://doi.org/10.3390/app11198798).
- [16] N. Arora, S. Dua, V.K. Singh, S.K. Singh, and T. Senthikumar, "Fillers and mechanical properties of 3D-printed polymer composites: A comprehensive review," Mater. Today Commun., vol. 40, 109617, 2024, doi: [10.1016/j.mtcomm.2024.109617](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109617).
- [17] J.N. Coleman, U. Khan, W.J. Blau, and Y.K. Gun'ko, "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites," Carbon, vol. 44, no. 9, pp. 1624-1652, 2006, doi: [10.1016/j.carbon.2006.02.038](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038).
- [18] S. Stankovich et al., "Graphene-based composite materials," Nature, vol. 442, no. 7100, pp. 282-286, 2006, doi: [10.1038/nature04969](https://doi.org/10.1038/nature04969).
- [19] P.C. Ma, N.A. Siddiqui, G. Marom, and J.K. Kim, "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review," Compos. A Appl. Sci. Manuf., vol. 41, no. 10, pp. 1345-1367, 2010, doi: [10.1016/j.compositesa.2010.07.003](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.003).
- [20] E.W. Fenta and B.A. Mebratie, "Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques," Heliyon, vol. 10, no. 16, e36490, 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e36490](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36490).
- [21] D.R. Dreyer, S. Park, C.W. Bielawski, and R.S. Ruoff, "The chemistry of graphene oxide," Chem. Soc. Rev., vol. 39, pp. 228-240, 2010, doi: [10.1039/B917103G](https://doi.org/10.1039/B917103G).
- [22] H. Guo, R. Lv, and S. Bai, "Recent advances on 3D printing graphene-based composites," Nano Mater. Sci., vol. 1, no. 2, pp. 101-115, 2019, doi: [10.1016/j.nanoms.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.03.003).
- [23] J. Jyoti, P. Srivastav, D. Singh, and B.P. Singh, "Phase transition and anomalous rheological properties of graphene oxide-carbon nanotube ABS hybrid composites," Compos. B Eng., vol. 154, pp. 337-350, 2018, doi: [10.1016/j.compositesb.2018.08.100](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.100).
- [24] Y. Chen, G. Sui, X. Liu, and T. Wang, "EMI shielding and dynamic mechanical analysis of graphene oxide-carbon nanotube-ABS hybrid composites," Polym. Test., vol. 91, 106839, 2020, doi: [10.1016/j.polymertesting.2020.106839](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106839).
- [25] T. Sheikh and K. Behdinin, "Multiscale study of additively manufactured ABS-CNT nanocomposites," Appl. Mater. Today, vol. 35, 101963, 2023, doi: [10.1016/j.apmt.2023.101963](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101963).
- [26] S. Dul, B.J.A. Gutierrez, A. Pegoretti, J. Alvarez-Quintana, and L. Fambri, "3D printing of ABS nanocomposites reinforced with CNTs: Effect of printing parameters and CNT concentration," J. Mater. Sci. Technol., vol. 121, pp. 52-66, 2022, doi: [10.1016/j.jmst.2021.11.064](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.064).
- [27] T. Sheikh and K. Behdinin, "Experimental and multiscale study of additively manufactured ABS-CNT nanocomposites," Appl. Mater. Today, in press, 2024, doi: [10.1016/j.apmt.2023.101963](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101963).
- [1] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," Compos. B Eng., vol. 143, pp. 172-196, 2018, doi: [10.1016/j.compositesb.2018.02.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012).
- [2] T. Wohlers and T. Gornet, History of additive manufacturing, Wohlers Report 2014. Fort Collins, CO, USA: Wohlers Associates, 2014.
- [3] B.N. Turner, R. Strong, and S.A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," Rapid Prototyp. J., vol. 20, no. 3, pp. 192-204, 2014, doi: [10.1108/RPJ-01-2013-0012](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012).
- [4] X. Gao, D. Zhang, and S. Qi, "Material extrusion-based additive manufacturing: A review of filament and pellet extrusion," Addit. Manuf., vol. 68, 103527, 2023, doi: [10.1016/j.addma.2023.103527](https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103527).
- [5] ASTM F2792-12 a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2012.
- [6] H. Liu, K. Gong, A. Portela, Z. Cao, R. Dunbar, and Y. Chen, "Granule-based material extrusion is comparable to filament-based material extrusion in terms of mechanical performances of printed PLA parts," Addit. Manuf., vol. 47, 102303, 2021, doi: [10.1016/j.addma.2021.102303](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102303).
- [7] C. Suvanjumrat, K. Chansoda, and W. Chookaew, "Additive manufacturing advancement through large-scale screw-extrusion 3D printing," Clean. Eng. Technol., vol. 20, 100753, 2024.
- [8] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciuc, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," Polym. Test., vol. 69, pp. 157-166, 2018, doi: [10.1016/j.polymertesting.2018.05.020](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020).
- [9] A.W. Gebisa and H.G. Lemu, "Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment," Materials, vol. 11, no. 4, 500, 2018, doi: [10.3390/ma11040500](https://doi.org/10.3390/ma11040500).
- [10] R. Patel, C. Desai, S. Kushwah, and M.H. Mangrola, "Review of FDM process parameters for 3D printing of composite materials," Mater. Today Proc., vol. 60, pp. 2162-2166, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.02.385](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.385).
- [11] R. Rafiei et al., "Optimization of 3D printing process parameters for production of CNT/ABS nanocomposites using Taguchi method" (in Persian), Modares Mech. Eng., vol. 17, no. 10, 2017.
- [12] M. Khansari Nabi, A. Mehri, and M. Goudarzi, "Investigation of interlaminar fracture of Glass/ABS composite printed by novel hybrid method (FDM+Fiber)" (in Persian), Modares Mech. Eng., vol. 25, no. 2, pp. 107-115, 2024.
- [13] S. Dul, L. Fambri, and A. Pegoretti, "Filaments production and fused deposition modelling of ABS/carbon nanotubes composites," Nanomaterials, vol. 8, no. 1, 49, 2018, doi: [10.3390/nano8010049](https://doi.org/10.3390/nano8010049).
- [14] H.K. Sezer and O. Eren, "FDM 3D printing of MWCNT reinforced ABS nanocomposite parts with enhanced mechanical and electrical properties," J.

- [28] L.S. De Bortoli, R. De Farias, D.Z. Mezalira, L.M. Schabbach, and M.C. Fredel, "Functionalized carbon nanotubes for 3D-printed PLA nanocomposites," *Mater. Today Commun.*, vol. 31, 103402, 2022, doi: [10.1016/j.mtcomm.2022.103402](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103402).
- [29] R. Ivanova et al., "Composition-dependent surface and mechanical properties of PLA/graphene/CNT composites," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 249, 122702, 2020, doi: [10.1016/j.matchemphys.2020.122702](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122702).
- [30] T. Batakliiev et al., "Nanoindentation analysis of 3D-printed PLA-based composites reinforced with graphene and MWCNTs," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 13, 47260, 2019, doi: [10.1002/app.47260](https://doi.org/10.1002/app.47260).
- [31] N. Vidakis et al., "Additive manufacturing of multifunctional PLA/MWCNT nanocomposites," *Nanocomposites*, vol. 7, no. 1, pp. 184-199, 2021, doi: [10.1080/20550324.2021.2000231](https://doi.org/10.1080/20550324.2021.2000231).
- [32] S.K. Soni, V. Tody, and B. Thomas, Influence of dispersion technique/time on dispersion stability, aspect ratio and morphology of multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Nanotechnology*, Vol. 18, No. 5/6/7/8, pp. 590-609, 2021. doi: [10.1504/IJNT.2021.116176](https://doi.org/10.1504/IJNT.2021.116176).