

مطالعه تجربی خواص مکانیکی قطعات نانوکامپوزیتی ABS تقویت شده با نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن تولید شده به روش‌های چاپ سه‌بعدی FDM و FGF

سواره محسن محی الدین شیخان
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
مهران محبوب‌خواه
استاد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
رضا نجار
استاد، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

ساخت افزایشی به‌ویژه روش‌های اکستروژنی FDM و FGF توجه گسترده‌ای را جلب کرده است. با این حال، خواص مکانیکی ضعیف پلیمرهایی نظیر اکرونیتیل-بوتادین-استایرن (ABS) کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. در این پژوهش، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چنددیواره عامل‌دار و نانوصفات اکسیدگرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ABS بررسی شد. نانوکامپوزیت‌ها با سه ترکیب $0.15\% \text{GO} + 0.1\% \text{CNT}$ ، $0.15\% \text{GO} + 0.15\% \text{CNT}$ و $0.1\% \text{GO} + 0.2\% \text{CNT}$ به روش اختلاط شیمیایی تهیه شدند. نمونه‌های استاندارد کشش، خمش سه‌نقطه‌ای و ضربه ایزود با دو روش FDM و FGF چاپ شدند. ترکیب متوازن $0.15\% \text{GO} + 0.15\% \text{CNT}$ بیشترین بهبود را در استحکام کششی (۳۸٪) و مدول خمشی (۴۲٪) نسبت به ABS خالص نشان داد. ترکیبات با نسبت نابرابر به دلیل انباشتگی یا درهم‌تنیدگی ذرات، عملکرد ضعیف‌تری داشتند. روش FGF علیرغم حذف فیلامنت‌سازی، خواص قابل مقایسه با FDM (اختلاف کمتر از ۱۵٪) ارائه داد و از نظر اقتصادی برتر است. تصاویر FESEM پراکنش یکنواخت نانوذرات و مکانیسم‌های پل‌زنی توسط CNT و انحراف ترک توسط GO را تأیید کرد که توجیه‌گر بهبود همزمان استحکام و چقرمگی در نمونه‌های متوازن است.

واژه‌های کلیدی: ساخت افزودنی، ABS، نانولوله کربنی، اکسید گرافن، FDM، FGF، خواص مکانیکی.

Experimental Study on the Mechanical Properties of ABS Nanocomposite Parts Reinforced with CNTs and GO Produced by FDM and FGF 3D Printing Methods

Sewara Mohsin Mahealdeem Shekhan

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

Mehran Mahboubkhah

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

Reza Najjar

Department of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Additive manufacturing, particularly extrusion-based methods such as FDM and FGF, has attracted significant attention. However, the poor mechanical properties of polymers like ABS limit their application. In this study, the effect of adding functionalized multi-walled carbon nanotubes and graphene oxide nanoplatelets on the mechanical properties of ABS-based composites was investigated. Nanocomposites with different weight percentages, including three compositions of $0.15\% \text{GO} + 0.15\% \text{CNT}$, $0.2\% \text{GO} + 0.1\% \text{CNT}$, and $0.1\% \text{GO} + 0.2\% \text{CNT}$, were prepared using a chemical mixing method. Standard specimens for tensile, three-point bending, and Izod impact tests were printed using both FDM and FGF methods. The balanced hybrid of $0.15\% \text{GO} + 0.15\% \text{CNT}$ improved tensile strength (38%) and flexural modulus (42%) compared to neat ABS. Compositions with unbalanced ratios exhibited weaker performance due to agglomeration or entanglement of particles. Despite eliminating filament preparation, FGF exhibited comparable properties to FDM (<15% difference in strength) and proved more economical. FESEM images confirmed uniform nanoparticle dispersion, crack bridging (CNT), and crack deflection (GO), justifying simultaneous strength and toughness improvement in the balanced hybrid.

Keywords: Additive manufacturing, ABS, Carbon nanotubes, Graphene oxide, FDM, FGF, Mechanical properties.

(FGF)، به‌دلیل انعطاف‌پذیری در طراحی، کاهش ضایعات و حذف قالب، تحول عظیمی در صنایع مختلف ایجاد کرده است [۱]. در میان فرآیندهای AM، روش FDM به‌دلیل سادگی و هزینه کم، پرکاربردترین روش محسوب می‌شود [۲]. از جمله پلیمرهای مهندسی، اکرونیتیل-

۱- مقدمه

فناوری ساخت افزایشی^۱ (AM) به‌ویژه روش‌های اکستروژنی مانند لایه‌نشانی ذوبی با فیلامنت^۲ (FDM) و ساخت مستقیم با گرانول^۳

3 - Fused Granular Fabrication

1 - Additive Manufacturing
2- Fused Deposition Modeling

بوتادین-استایرن^۱ ABS به دلیل چقرمگی مناسب، پایداری حرارتی و هزینه مقرون به صرفه، یکی از پرکاربردترین مواد در این فرآیندها است [۳]. با این حال، استحکام مکانیکی نسبتاً ضعیف ABS خالص، به ویژه در قطعات باربر، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها است [۴]. تحقیقات نشان داده است که پارامترهایی نظیر ضخامت لایه، جهت ساخت و زاویه پرکننده تأثیر مستقیمی بر رفتار مکانیکی قطعات FDM دارند [۵]. همچنین رفتار ناهمسانگرد قطعات چاپ شده، پیش‌بینی خواص را پیچیده می‌کند [۶]. برای رفع این محدودیت، افزودن نانوپرکننده‌های کربنی به عنوان یک راهکار مؤثر شناخته شده است [۷]. نانوپرکننده‌هایی نظیر نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) و نانوصفحات اکسید گرافن (GO) به دلیل نسبت ابعادی بالا و خواص استثنائی، توجه گسترده‌ای را جلب کرده‌اند [۸]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن MWCNT به ABS می‌تواند استحکام کششی را تا ۳۳٪ افزایش دهد [۹] و استفاده از GO نیز مدول خمشی و مقاومت به ضربه را بهبود می‌بخشد [۱۰]. با این حال، بیشتر این تحقیقات بر روی تقویت تک‌پرکننده متمرکز بوده‌اند [۱۱] و اثر هم‌افزایی ترکیب هیبریدی MWCNT و GO در ماتریس ABS به ندرت و عمدتاً با روش‌های قالب‌گیری تزریقی بررسی شده است [۱۲]. در حالی که رفتار این نانوکامپوزیت‌ها در فرآیندهای ساخت افزایشی تفاوت اساسی با روش‌های سنتی دارد [۱۳].

از سوی دیگر، روش مرسوم FDM نیازمند مرحله پرهزینه و زمان‌بر پیش‌ساخت فیلامنت است که ضمن افزایش دمای فرآیند، خطر تخریب حرارتی پلیمر و نانوپرکننده‌ها را نیز به همراه دارد [۱۴]. در مقابل، روش نوین FGF با تغذیه مستقیم گرانول‌های کامپوزیتی به داخل اکسترودر، این مرحله میانی را حذف کرده و از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی برتر است [۱۵]. اسپورک و همکاران نشان دادند که با استفاده از FGF می‌توان قطعات کامپوزیتی با خواص جهت‌دار تولید کرد [۱۶]. همچنین لاوج و همکاران بر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی روش FGF تأکید کرده‌اند [۱۷]. با وجود این، یک خلأ تحقیقاتی بارز وجود دارد: تاکنون هیچ مطالعه سیستماتیکی به مقایسه مستقیم خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی ABS/CNT/GO تولید شده با دو روش FDM و FGF نپرداخته است.

در سال‌های اخیر، چندین مطالعه به بررسی خواص نانوکامپوزیت‌های ABS با پرکننده‌های کربنی پرداخته‌اند. دینگ و همکاران، بهبود ۲۸ درصدی استحکام کششی را با افزودن MWCNT به ABS گزارش کردند [۱۸]. سونگ و همکاران در دو مطالعه جداگانه، تأثیر MWCNT [۱۹] و نانوپالکت‌های گرافن [۲۰] را بر خواص نانوکامپوزیت‌های ABS بررسی نمودند. کیم و همکاران اثر هم‌افزایی GO و MWCNT را در ماتریس ABS با روش قالب‌گیری تزریقی نشان دادند [۲۱]. تکینال و همکاران نیز بهبود خواص خمشی و ضربه‌ای ABS با افزودن نانوذرات TiN را گزارش کردند [۲۲]. علاوه بر این، مطالعات متعددی به نقش پارامترهای فرآیند FDM بر خواص مکانیکی پرداخته‌اند. یانگ و همکاران بهینه‌سازی پارامترهای FDM را مرور کرده‌اند [۲۳]. یائو و همکاران تأثیر زاویه جدایش لایه‌ها را بر استحکام کششی بررسی نمودند [۲۴]. چاکون و همکاران اثر ضخامت لایه و جهت ساخت را بر خواص مکانیکی PLA

مطالعه کردند [۲۵]. وانگ و همکاران به بررسی چسبندگی بین لایه‌ای در پلیمرهای ساخته شده به روش افزایشی پرداختند [۲۶]. همچنین اسپینلی و همکاران [۲۷] و کولور و همکاران [۲۸] به ترتیب اثر پارامترهای فرآیند و ناهمسانگردی مکانیکی در قطعات FDM را بررسی نمودند. وانگ و همکاران رفتار خمشی کامپوزیت‌های ABS تقویت شده با الیاف کربن و کولار را مطالعه کردند [۲۹]. در نهایت، ویداکیس و همکاران اخیراً نانوکامپوزیت ABS/TiN را با خواص مکانیکی بهبود یافته معرفی نمودند [۳۰].

بر مبنای خلأهای تحقیقاتی اشاره شده، نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر عبارتند از:

- (۱) تولید و ارزیابی سیستماتیک نانوکامپوزیت هیبریدی ABS/CNT/GO با مجموع وزنی ۰/۳٪ (شامل ۰/۱۵ CNT و ۰/۱۵ GO) برای اولین بار در فرآیندهای اکستروژن سه‌بعدی که بر خلاف مطالعات قبلی که از درصدهای بالای پرکننده (تا ۶٪) استفاده کرده‌اند [۹، ۱۹]. با بهینه‌سازی نسبت هیبریدی در مقادیر بسیار پایین، ضمن جلوگیری از کلوخگی، بهبود قابل توجهی در استحکام و چقرمگی ایجاد می‌کند.
 - (۲) مقایسه جامع خواص کششی، خمشی و ضربه‌ای قطعات چاپ شده با روش FDM و روش نوین FGF تا مشخص شود آیا حذف مرحله فیلامنت‌سازی به قیمت کاهش خواص مکانیکی تمام می‌شود یا خیر.
 - (۳) استفاده از روش اختلاط شیمیایی (انحلال در اتیل استات) به جای اختلاط مذاب که ضمن حفظ ساختار شیمیایی پلیمر و جلوگیری از تخریب حرارتی، پراکنش یکنواخت‌تر نانوذرات را فراهم می‌آورد.
 - (۴) شناسایی مکانیسم‌های ریزساختاری تقویت از طریق تصاویر FESEM شامل پل‌زنی ترک توسط نانولوله‌ها، انحراف ترک توسط صفحات GO و افزایش زبری سطح شکست که توجیه‌گر بهبود همزمان استحکام و چقرمگی در نمونه‌های هیبریدی است.
- در ادامه، مواد و روش‌ها، نتایج تجربی، بحث و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا مواد اولیه، روش تهیه نانوکامپوزیت‌ها، مراحل چاپ و آزمونهای مکانیکی و ریزساختاری بیان شده است.

۲-۱- مواد اولیه

مواد مورد استفاده برای ساخت نانوکامپوزیت‌های مورد بررسی به شرح زیر است:

ماتریس پلیمری: فیلامنت ABS تجاری (شرکت Xtrusion)، قطر ۱/۷۵ میلی‌متر و دمای ذوب حدود ۲۱۰-۲۳۰°C.
نانوپرکننده‌ها: نانولوله کربنی چنددیواره (MWCNT) با خلوص بیش از ۹۵٪، قطر خارجی ۲۰-۳۰ نانومتر، طول ۱-۲ میکرومتر، عامل‌دار شده با گروه هیدروکسیل (-OH)، نانوصفحات اکسید گرافن (GO) با خلوص بیش از ۹۹/۵٪، ضخامت ۴-۷ نانومتر، سطح ویژه حدود ۵۰۰ مترمربع بر گرم. نانومواد از شرکت US Research Nanomaterials تهیه شدند.

حلال: اتیل استات برای انحلال ABS و پراکنده سازی نانوذرات.

۲-۲- تهیه نانوکامپوزیت های ABS

در این پژوهش، به منظور جلوگیری از آفت خواص مکانیکی ناشی از تخریب حرارتی پلیمر و نانوذرات در فرآیند اختلاط مذاب، از روش اختلاط شیمیایی (انحلال در حلال آلی) مطابق مراحل شکل ۱ استفاده گردید. درصدهای وزنی نانوپراکنده ها (ارائه شده در جدول ۱) بر اساس مرور سیستماتیک ادبیات فن و همچنین نتایج آزمون های مقدماتی (پایلوت) با درصدهای ۰/۳، ۰/۵ و ۱٪ انتخاب شدند که در آن ها، محدوده ۰/۳ بیشترین بهبود خواص مکانیکی را نشان داد. بدین منظور، ابتدا ABS و نانوذرات مطابق ترکیب ارائه شده در جدول ۱ به صورت جداگانه در حلال اتیل استات حل و پراکنده شدند و به مدت یک ساعت در حمام اولتراسونیک با توان بالا و دمای ۶۰° سانتی گراد قرار گرفتند تا پراکنش اولیه ذرات به خوبی انجام شود. پس از پراکنده سازی، دو محلول با یکدیگر مخلوط شده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۷۰° سانتی گراد و تحت خلأ خشک شدند؛ شایان ذکر است که در طی فرآیند خشک شدن، از هم زن مغناطیسی با دور مناسب استفاده شد تا از ته نشینی ذرات در کف ظرف جلوگیری به عمل آید و توزیع یکنواختی در سراسر حجم محلول حفظ گردد. در نهایت، گرانول های کامپوزیتی حاصل، به منظور دستیابی به یکنواختی ترکیب در تمام بخش های ماده اولیه، چندین بار خرد و آسیاب شدند تا برای فرآیند چاپ سه بعدی آماده گردند.



شکل ۱- مراحل تهیه نانوکامپوزیت

جدول ۱- ترکیب هیبریدی CNT-GO و درصدهای وزنی کل پراکنده های مورد بررسی در این مطالعه

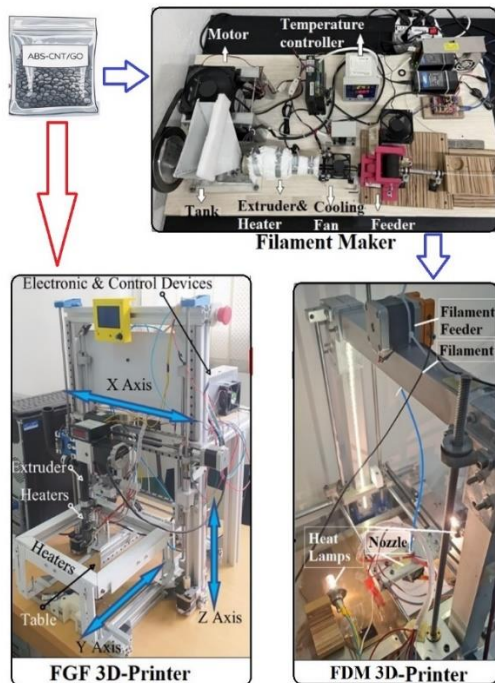
شماره آزمایش	روش ساخت	ABS	MWCNT	GO
۱	FDM	٪۱۰۰	۰	۰
۲	FGF	٪۱۰۰	۰	۰
۳	FDM	٪۹۹/۷	٪۰/۱۵	٪۰/۱۵
۴	FGF	٪۹۹/۷	٪۰/۱۵	٪۰/۱۵
۵	FDM	٪۹۹/۷	٪۰/۲	٪۰/۱
۶	FGF	٪۹۹/۷	٪۰/۲	٪۰/۱
۷	FDM	٪۹۹/۷	٪۰/۱	٪۰/۲
۸	FGF	٪۹۹/۷	٪۰/۱	٪۰/۲

۲-۳- چاپ قطعات نمونه آزمون ها

در این تحقیق نمونه های کشش مطابق استاندارد ASTM D638-IV، نمونه های خمش مطابق استاندارد ASTM D790 و نمونه های ضربه شیاردار مطابق استاندارد Notched Izod، و برای هر نوع از مواد توصیف شده در جدول ۱ با پنج بار تکرار مطابق دو روش چاپ، مطابق مراحل شکل ۲، ساخته شدند همچنین، انحراف معیار حاصل از نتایج آزمون های مکانیکی در نمودار نشان داده شده اند.

روش FDM: برای ساخت قطعات با روش FDM، ابتدا با استفاده از

به پرشدگی مؤثر (Effective Infill) یکسان در قطعات تولیدی با دو روش، انتخاب گردید. این تنظیم در نرم افزار اسلایسر اعمال شد تا ضمن جبران اثرات ناشی از برگشت مواد (Backflow)، از ایجاد شکاف بین رسترهای مجاور جلوگیری شود.



شکل ۲- مراحل چاپ نمونه های آزمون

فن خنک کننده در حالت روشن: برای تسریع انجماد لایه ها و کاهش جمع شدگی و تاب بردگی، به ویژه در قطعات با سطح مقطع زیاد، فعال گردید.

فاصله جمع شدگی (Retraction) معادل ۳ میلی متر نیز با هدف کاهش نشی مواد در حین حرکت های غیر چایی، بر اساس آزمون های خطی تنظیم شد.

نهایتاً روش کالیبراسیون با اندازه گیری ابعادی نمونه ها توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی متر و جبران سازی انقباض و خطاهای ابعادی در نرم افزار Simplify3D انجام گردید تا دقت ابعادی نمونه ها در محدوده تolerانس استاندارد (حداکثر ۰/۱ میلی متر اختلاف با ابعاد اسمی) حفظ شود. تمامی این تنظیمات، برای هر دو روش FDM و FGF به صورت یکسان اعمال گردید تا تنها متغیر مستقل، نوع ماده (ترکیب نانوکامپوزیت) باشد و نتایج قابل مقایسه باشند

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی چاپگرهای FDM و FGF

دستگاه فیلامنت ساز (ساخته شده در گروه مهندسی ساخت و تولید دانشگاه تبریز) گرانول های نانوکامپوزیت ها به فیلامنت به قطر ۱/۷۵ میلی متر تبدیل شده است. سپس با استفاده از چاپگر دکارتی (ساخت گروه مهندسی ساخت و تولید دانشگاه تبریز)

روش FGF: چاپگر اکستروژدر مستقیم گرانول (ساخت گروه مهندسی ساخت و تولید دانشگاه تبریز)

انتخاب پارامترهای چاپ برای هر دو روش FDM و FGF مطابق جدول ۲ انجام شده است.

لازم به ذکر است که تمامی پارامترهای مندرج در جدول ۲، پس از انجام یک سری آزمون های مقدماتی، برای تمام مواد و دو روش ساخت به صورت ثابت در نظر گرفته شدند تا تغییرات در خواص مکانیکی صرفاً ناشی از نوع و نسبت نانوپرکننده ها باشد. مبنای انتخاب برخی از این پارامترها به شرح زیر است:

قطر نازل ۰/۸ میلی متر: این قطر، تعادل مناسبی بین سرعت چاپ، کیفیت سطح و جلوگیری از گرفتگی نازل (Clogging) ناشی از حضور نانوذرات ایجاد می کند. استفاده از نازل های با قطر کمتر (مانند ۰/۴ میلی متر) با توجه به افزایش لزجت مذاب کامپوزیتی، باعث بروز ناپایداری در اکستروژن و گرفتگی مکرر نازل می شد.

دمای نازل ۲۱۰° سلسیوس: بر اساس محدوده دمای ذوب ABS (۲۱۰°-۲۳۰° سلسیوس) و با هدف جلوگیری از تخریب حرارتی پلیمر و نانوذرات، در پایین ترین حد ممکن انتخاب گردید. این دما ضمن تأمین سیالیت کافی برای اکستروژن، از ایجاد دود و بوه های ناشی از تجزیه پلیمر نیز جلوگیری می نماید.

دمای محفظه ۶۰° سلسیوس: برای کاهش تنش های پسماند و جلوگیری از تاب خوردگی قطعات و همچنین افزایش چسبندگی لایه های اولیه به بستر انتخاب شد. این دما بر اساس توصیه های استاندارد تولیدکننده فیلامنت ABS و نیز تجارب پیشین در چاپ قطعات ABS تعیین گردید.

ضخامت لایه ۰/۳ میلی متر: به عنوان ضخامت بهینه از نظر تعادل بین سرعت چاپ، کیفیت سطح و چسبندگی بین لایه های برگزیده شد. مطالعات پیشین نشان داده اند که ضخامت های کمتر از ۰/۲ میلی متر باعث افزایش زمان چاپ و کاهش استحکام بین لایه ای شده و ضخامت های بیشتر از ۰/۴ میلی متر نیز کیفیت سطح و دقت ابعادی را کاهش می دهند.

سرعت چاپ ۵۰ میلی متر بر ثانیه: به عنوان سرعتی نسبتاً پایین جهت افزایش دقت ابعادی، بهبود چسبندگی لایه ها، و جلوگیری از ایجاد حفره های داخلی ناشی از اکستروژن ناقص مذاب حاوی نانوذرات انتخاب گردید. سرعت های بالاتر از این مقدار، باعث کاهش زمان ماندگاری مواد در نازل و در نتیجه کاهش کیفیت چسبندگی بین لایه ای می شوند.

الگوی پرشوندگی مستطیلی (Rectilinear) با زاویه ۴۵°±: به عنوان یک الگوی استاندارد و متقارن که توزیع بار را در جهات مختلف بهینه کرده و بیشینه استحکام مکانیکی را در جهات گوناگون فراهم می آورد، انتخاب گردید. همچنین چگالی پرشوندگی ۱۰۰٪ به منظور حذف اثر حفره های داخلی بر روی خواص مکانیکی و مقایسه خالص تأثیر نانوپرکننده ها بر رفتار قطعات جامد، در نظر گرفته شد.

عرض رستر معادل ۱۲۰٪ قطر نازل (۰/۹۶ میلی متر): جهت همسان سازی حجم اکستروژن در هر دو روش FDM و FGF و دستیابی

پارامتر	FGF	FDM
ماده اولیه	گرانول های نانوکامپوزیتی	فیلامنت نانوکامپوزیتی ۱/۷۵ میلی متر
روش اکستروژن	اکستروژن مستقیم گرانول	اکستروژن مبتنی بر فیلامنت
دمای نازل	۲۱۰° سانتی گراد	
دمای محیط -محفظه	کنترل شده، ۶۰° سانتی گراد	
آماده سازی ماده اولیه	نیاز نیست	نیاز به اکستروژن فیلامنت دارد
چارچوب مقایسه ای	جی کد و تنظیمات چاپ یکسان	
قطر نازل	۰/۸ میلی متر	
ضخامت لایه	۰/۳ میلی متر	
سرعت چاپ	۵۰ میلی متر بر ثانیه	
چگالی پرشوندگی	۱۰۰٪	
الگوی پرشوندگی	مستطیلی (Rectilinear)	
جهت گیری رستر	±۴۵°	
عرض رستر	۰/۹۶ میلی متر	
فن خنک کننده	روشن	
فاصله جمع شدگی (Retraction)	۳ میلی متر	
روش کالیبراسیون	اندازه گیری ابعادی نمونه ها با کولیس و جبران سازی در Simplify3D	

۲-۴- آزمون های مکانیکی و ریزساختاری

آزمون ها برای شناسایی نمونه های استاندارد ساخته شده به شرح زیر انجام شد: (الف) آزمون کشش: دستگاه تست کشش یونیورسال Zwick/Roell با سرعت ۵ mm/min. (ب) آزمون خمش سه نقطه ای: سرعت ۲ mm/min. (ج) آزمون ضربه ایزود: دستگاه پاندول J ۵. (د) ریزساختار: میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM, TESCAN MIRA3) روی سطح مقطع شکست نمونه های کشش.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون کشش

در این بخش، نتایج آزمون کشش برای نمونه های ساخته شده با دو روش FDM و FGF در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده است. تمامی مقادیر عددی گزارش شده در این بخش، میانگین ۵ تکرار آزمون بوده و انحراف معیار مربوطه در جداول نتایج (جدول ۳ تا ۵) ارائه شده است.

مطابق نتایج ارائه شده در منحنی های شکل ۳، شکل ۴ و جداول ۳ تا ۵ که نتایج کلیدی آزمون های کشش را نشان داده اند، تفاسیر زیر در مورد هر کدام از ترکیب های پلیمری ارائه می شود:

الف) ترکیب هیبریدی متوازن با درصدهای مساوی GO و CNT
یعنی 0.15%CNT+0.15%GO:

این ترکیب، بهترین عملکرد کششی را نسبت به ABS خالص در هر دو روش چاپ نشان داد. برای نمونه های ساخته شده با روش FDM و این ترکیب بهینه، مدول الاستیسیته از ۱/۶۳ به ۲ گیگاپاسکال (۲۳٪ افزایش) و استحکام کششی از ۳۳ به ۳۷/۴۳ گیگاپاسکال (۱۳٪ افزایش)

نسبت به ABS خالص رسید. در روش FGF، استحکام کششی برای همین ترکیب از ۲۷/۶۷ به ۳۰/۵ گیگاپاسکال (۱۰٪ افزایش) نسبت به ABS خالص افزایش یافت. به طور کلی، استحکام کششی نمونه های ساخته شده با FDM بالاتر از FGF بود که این امر را می توان به جهت گیری بیشتر نانوذرات در حین فرآیند فیلامنت سازی (که باعث اعمال تنش برشی بر روی مذاب حاوی نانوذرات می شود) نسبت داد. همچنین کرنش شکست در هر دو فرآیند با افزودن نانوذرات نسبت به ABS خالص کاهش یافت که ناشی از افزایش سفتی و کاهش شکل پذیری ماتریس پلیمری در اثر محدودیت حرکت زنجیرهای پلیمر توسط نانوپرکننده ها است. به طوری که در روش FDM، کرنش شکست از ۴٪ به ۳/۹٪ (کاهش جزئی) و در روش FGF از ۴/۳٪ به ۴/۸٪ (افزایش جزئی) رسید که نشان دهنده رفتار متفاوت این ترکیب در دو روش است.

(ب) ترکیب با نسبت نابرابر 0.2%GO+0.1%CNT:

این ترکیب، کمترین استحکام کششی را در بین سایر ترکیبات در هر دو روش ساخت FDM و FGF از خود نشان داد. مطابق جداول ۳ تا ۵، در روش FDM، مدول الاستیسیته این ترکیب ۱/۷۲ گیگاپاسکال و استحکام کششی آن ۳۱/۵ گیگاپاسکال گزارش شده است که نسبت به ترکیب متوازن (۲/۰ گیگاپاسکال و ۳۷/۸ گیگاپاسکال) به مراتب ضعیف تر است. دلیل اصلی این رفتار را می توان به دو عامل کلیدی نسبت داد: نخست، فراوانی صفحات GO نسبت به CNT در این ترکیب باعث می شود که صفحات GO به دلیل برهم کنش های واندروالسی قوی، تمایل به کلوخگی (Agglomeration) و روی هم قرار گرفتن (Stacking) پیدا کنند. این یک شبکه سه بعدی پیوسته جلوگیری می کند. دوم، کمبود CNT در این نسبت باعث می شود که پل های اتصال کافی بین صفحات GO برای انتقال مؤثر بار از ماتریس به نانوذرات وجود نداشته باشد. در نتیجه، نانوذرات به جای نقش تقویت کنندگی، به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و شروع و انتشار ترک را تسریع می نمایند.

(ج) ترکیب با نسبت نابرابر 0.2%CNT+0.1%GO:

در این ترکیب، CNT نقش غالب را ایفا می کند. مطابق جداول ۳ تا ۵، در روش FDM، مدول الاستیسیته این ترکیب ۱/۸ گیگاپاسکال و استحکام کششی آن ۳۳/۵ گیگاپاسکال گزارش شده است که نسبت به ABS خالص بهبود یافته، اما همچنان از ترکیب متوازن (۲ گیگاپاسکال و ۳۷/۸ گیگاپاسکال) کمتر است. دلیل این رفتار را می توان به دو مکانیزم زیر نسبت داد: نخست، حضور غالب CNT ها به دلیل استحکام ذاتی بالا و نسبت ابعادی زیاد، موجب افزایش استحکام کششی نسبت به حالت خالص می شود. با این حال، دوم، مقدار ناکافی GO در این ترکیب، باعث می شود که مکانیزم انحراف ترک به خوبی ترکیب متوازن عمل نکند. علاوه بر این، فراوانی بیش از حد CNT نسبت به GO می تواند منجر به تجمع موضعی نانولوله ها گردد که خود به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و از تشکیل یک شبکه یکپارچه و همگن جلوگیری می نماید. به بیان دیگر، نسبت مساوی دو پرکننده، امکان تشکیل یک شبکه سه بعدی همگن را فراهم می آورد که در آن نانولوله های کربنی به عنوان پل های اتصال بین صفحات GO عمل کرده و توزیع تنش را در سراسر ماتریس بهینه می سازند. این مکانیزم شبکه سازی، دلیل اصلی برتری ترکیب متوازن نسبت به هر دو ترکیب با نسبت نابرابر می باشد.

$4/3 \pm 0.05$	$4/0 \pm 0.08$	0.2CNT-0.1GO
$3/2 \pm 0.04$	$3/8 \pm 0.07$	0.1CNT-0.2GO
$4/8 \pm 0.06$	$3/9 \pm 0.07$	0.15CNT-0.15GO

۳-۲- نتایج آزمون خمش

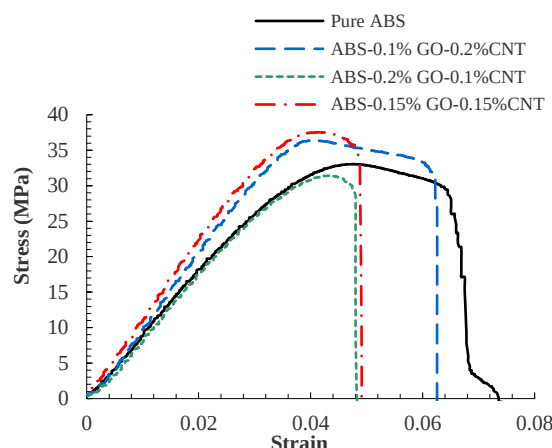
در نمودارهای شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب نتایج آزمون‌های خمش و منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های ساخته شده با روش FDM و FGF نشان داده شده است. تمامی مقادیر عددی گزارش شده در این بخش، میانگین ۵ تکرار آزمون بوده و انحراف معیار مربوطه در جداول نتایج (جدول ۶ تا ۸) ارائه شده است. نتایج کلیدی آزمون‌های خمش نیز در این جداول آمده و تفاسیر زیر در مورد هر کدام از ترکیب‌های پلیمری ارائه می‌شود:

الف) ترکیب هیبریدی متوازن 0.15%CNT+0.15%GO:

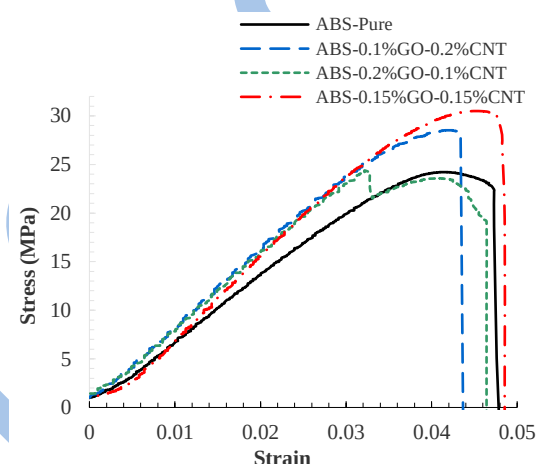
این ترکیب، بهترین عملکرد خمشی را در هر دو روش چاپ نشان داد. برای نمونه‌های ساخته شده با روش FDM و این ترکیب بهینه، مدول خمشی از ۲ به ۲/۲ گیگاپاسکال (۱۰٪ افزایش) و استحکام خمشی از ۶۵ به ۶۸ مگاپاسکال (۵٪ افزایش) نسبت به ABS خالص رسید. در روش FGF، مدول خمشی برای همین ترکیب از ۱/۴ به ۲/۲ گیگاپاسکال (۵۷٪ افزایش) و استحکام خمشی از ۳۸ به ۵۴ مگاپاسکال (۴۲٪ افزایش) نسبت به ABS خالص افزایش یافت. این بهبود چشمگیر در روش FGF نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه توزیع یکنواخت نانوذرات در گرانول‌های کامپوزیتی و عدم نیاز به مرحله فیلامنت‌سازی (که ممکن است باعث تخریب حرارتی و کاهش اثر تقویت‌کنندگی شود) می‌باشد. همچنین کرنش شکست خمشی در روش FDM از ۴/۶۳٪ به ۳/۸۳٪ (کاهش ۱۷٪) و در روش FGF از ۵/۳٪ به ۳/۸٪ (کاهش ۲۸٪) رسید که نشان‌دهنده افزایش سفتی و کاهش شکل‌پذیری در اثر افزودن نانوذرات است.

ب) ترکیب با نسبت نابرابر 0.1%CNT+0.2%GO:

رفتار این ترکیب در آزمون خمشی به شدت تحت تأثیر روش ساخت قرار گرفت. در روش FDM، این ترکیب با مدول خمشی ۱/۸ گیگاپاسکال و استحکام خمشی ۵۳ مگاپاسکال، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین ترکیبات نشان داد. دلیل این رفتار را می‌توان به انباشتگی صفحات GO (به دلیل فراوانی آن‌ها نسبت به CNT) نسبت داد که باعث ایجاد نقاط تمرکز تنش و کاهش سطح مشترک مؤثر برای انتقال بار از ماتریس به نانوذرات می‌شود. با این حال، در روش FGF، این ترکیب به طور شگفت‌انگیزی بهترین عملکرد خمشی را با مدول خمشی ۳ گیگاپاسکال و استحکام خمشی ۶۲ مگاپاسکال از خود نشان داد. این رفتار معکوس و قابل توجه را می‌توان با این مکانیزم تفسیر کرد: در روش FGF که ماده اولیه به صورت گرانول مستقیم وارد اکسترودر می‌شود و تنش برشی کمتری به مذاب وارد می‌شود، صفحات GO که سختی بالایی دارند، به صورت تصادفی در ماتریس توزیع شده و به دلیل ساختار صلب خود، نقش مؤثری در افزایش سفتی خمشی ایفا می‌کنند. در مقابل، در روش FDM که مرحله فیلامنت‌سازی باعث اعمال تنش برشی و جهت‌گیری ذرات می‌شود، فراوانی GO به دلیل ماهیت صفحه‌ای، تمایل به انباشتگی و جهت‌گیری نامطلوب پیدا کرده و عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهد. این تفاوت اساسی در رفتار، اهمیت انتخاب روش ساخت متناسب با نوع و



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش آزمون کشش (FDM)



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش آزمون کشش (FGF)

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار مدول الاستیسیته نانوپلیمرهای

ABS (مقادیر بر حسب GPa)

روش FGF	روش FDM	نوع نانوپلیمر
$1/5 \pm 0.06$	$1/63 \pm 0.07$	ABS خالص
$1/75 \pm 0.05$	$1/8 \pm 0.06$	0.2CNT-0.1GO
$1/62 \pm 0.06$	$1/72 \pm 0.05$	0.1CNT-0.2GO
$1/88 \pm 0.09$	$2/0 \pm 0.08$	0.15CNT-0.15GO

جدول ۴- میانگین و انحراف معیار تنش تسلیم نانوپلیمرهای ABS

(مقادیر بر حسب MPa)

روش FGF	روش FDM	نوع نانوپلیمر
$24/2 \pm 1/1$	$33/0 \pm 1/6$	ABS خالص
$28/7 \pm 1/7$	$33/5 \pm 1/3$	0.2CNT-0.1GO
$24/8 \pm 1/5$	$31/5 \pm 1/4$	0.1CNT-0.2GO
$30/8 \pm 1/8$	$37/8 \pm 1/9$	0.15CNT-0.15GO

جدول ۵- میانگین و انحراف معیار کرنش شکست نانوپلیمرهای ABS

(مقادیر بر حسب %)

روش FGF	روش FDM	نوع نانوپلیمر
$4/3 \pm 0.06$	$4/0 \pm 0.09$	ABS خالص

نوع نانوپلیمر	روش FDM	روش FGF
ABS خالص	$2/0 \pm 0/4$	$1/4 \pm 0/2$
0.2CNT-0.1GO	$2/4 \pm 0/5$	$1/2 \pm 0/2$
0.1CNT-0.2GO	$1/8 \pm 0/3$	$3/0 \pm 0/6$
0.15CNT-0.15GO	$2/2 \pm 0/4$	$2/2 \pm 0/4$

جدول ۷- میانگین و انحراف معیار تنش تسلیم خمشی نانوپلیمرهای ABS (مقادیر بر حسب MPa)

نوع نانوپلیمر	روش FDM	روش FGF
ABS خالص	$65/0 \pm 2/1$	$38/0 \pm 1/7$
0.2CNT-0.1GO	$73/0 \pm 2/3$	$31/0 \pm 1/3$
0.1CNT-0.2GO	$53/0 \pm 2/1$	$62/0 \pm 2/9$
0.15CNT-0.15GO	$68/0 \pm 2/8$	$54/0 \pm 2/6$

جدول ۸- میانگین و انحراف معیار کرنش شکست خمشی نانوپلیمرهای ABS (مقادیر بر حسب %)

نوع نانوپلیمر	روش FDM	روش FGF
ABS خالص	$3/5 \pm 0/5$	$4/0 \pm 0/6$
0.2CNT-0.1GO	$2/8 \pm 0/4$	$3/0 \pm 0/4$
0.1CNT-0.2GO	$3/3 \pm 0/5$	$2/8 \pm 0/5$
0.15CNT-0.15GO	$3/8 \pm 0/6$	$3/3 \pm 0/6$

۳-۳- نتایج آزمون ضربه

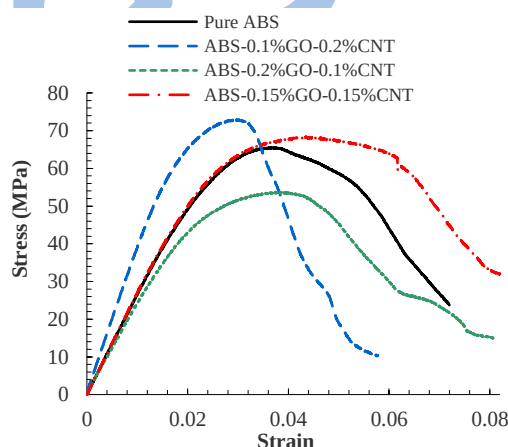
نتایج مقاومت به ضربه در شکل ۷ نشان داده شده است. برای نمونه‌های ساخته شده به روش FGF، مقاومت به ضربه از $0/45$ ژول ABS خالص به $0/8$ ژول (افزایش ۷۷٪) برای ترکیب 0.1CNT-0.2GO رسید. سیستم هیبریدی با درصدهای یکسان، بهبودی تا $0/65$ ژول (افزایش ۴۴٪) نشان داد.

در نمونه‌های FDM، ABS خالص مقدار ضربه‌ای برابر $0/82$ ژول داشت و فرمولاسیون‌های هیبریدی مقادیری بین $0/65$ تا $0/88$ ژول نشان دادند. بیشترین مقاومت به ضربه در FDM برای سیستم 0.1CNT-0.2GO با مقدار $0/88$ ژول ثبت شد. تفاوت بین روندهای ضربه در FDM و FGF نشان می‌دهد که رفتار شکست به شدت تحت تأثیر هر دو عامل تشکیل شبکه نانو و یکپارچگی بین‌لایه‌ای است. بهبودهای مشاهده شده در ترکیب‌های هیبریدی منتخب حاکی از مکانیسم‌های مؤثر انحراف و پل‌زنی ترک است، همانطور که تصاویر سطح شکست FESEM نیز آن را تأیید می‌کنند.

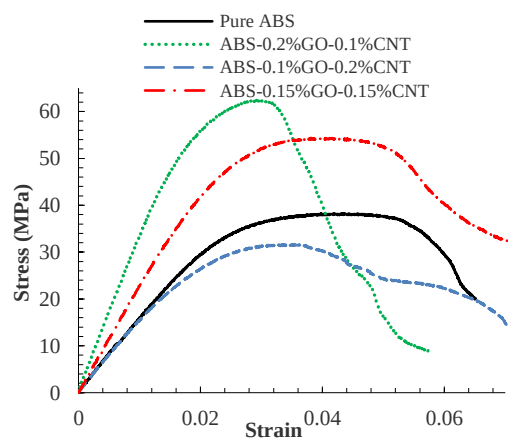
نسبت نانوپرکننده را به خوبی نشان می‌دهد.

ج) ترکیب با نسبت نابرابر 0.2%CNT+0.1%GO:

در این ترکیب، CNT نقش غالب را ایفا می‌کند. در روش FDM، این ترکیب با مدول خمشی $2/4$ گیگاپاسکال و استحکام خمشی ۷۳ مگاپاسکال، بهترین عملکرد را در بین تمام ترکیبات نشان داد. این برتری قابل‌توجه را می‌توان به حضور غالب CNT ها و جهت‌گیری مطلوب آن‌ها در راستای اکستروژن در طی فرآیند فیلامنت‌سازی نسبت داد که باعث افزایش چشمگیر مقاومت در برابر بار خمشی می‌شود. در روش FGF، این ترکیب با مدول خمشی $1/2$ گیگاپاسکال و استحکام خمشی ۳۱ مگاپاسکال، ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. دلیل این رفتار را می‌توان به عدم جهت‌گیری CNT ها در روش FGF (به دلیل حذف مرحله فیلامنت‌سازی) و همچنین تجمع موضعی نانولوله‌ها در غیاب صفحات GO کافی برای ایجاد شبکه سه‌بعدی نسبت داد. به بیان دیگر، در روش FGF که تنش برشی کمتری به مذاب وارد می‌شود، CNT ها به خوبی جهت‌گیری نکرده و نقش تقویت‌کنندگی خود را به خوبی ایفا نمی‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که برای بهره‌مندی از خواص عالی CNT در روش FGF، نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند یا استفاده از ترکیبات هیبریدی با نسبت‌های مناسب‌تر می‌باشد.

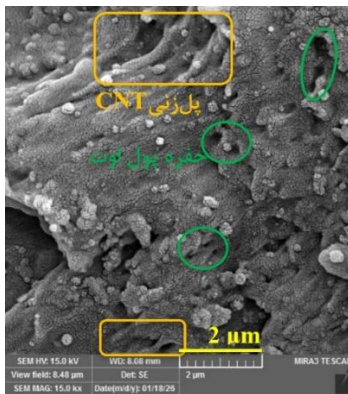


شکل ۵- منحنی تنش-کرنش آزمون خمش (FDM)

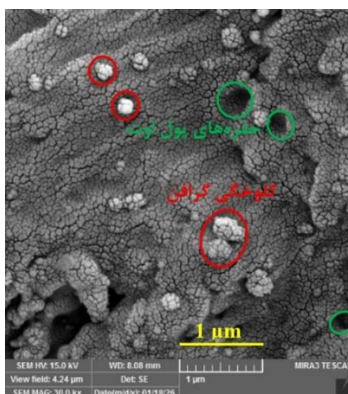


شکل ۶- منحنی تنش-کرنش آزمون خمش (FGF)

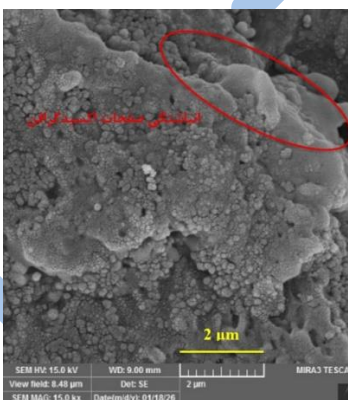
جدول ۹- میانگین و انحراف معیار مدول الاستیسیته خمشی نانوپلیمرهای ABS (مقادیر بر حسب GPa)



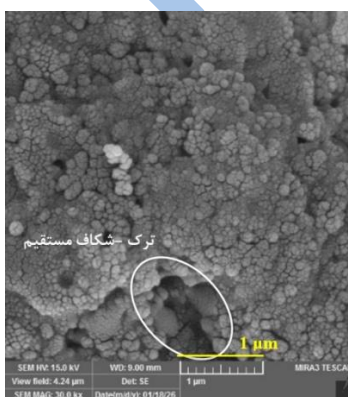
(ب) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.15% CNT-0.15% GO



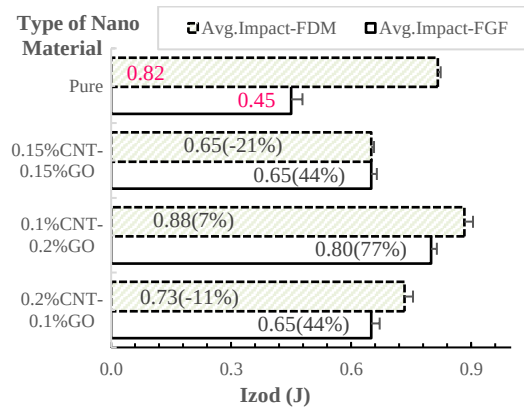
(ج) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.15% CNT-0.15% GO



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



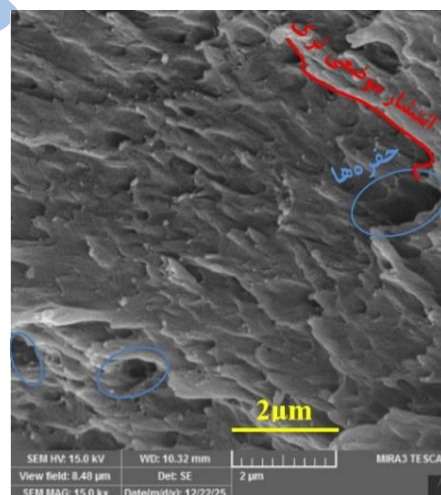
(ه) مقطع شکست ABS با افزودنی 0.1% CNT-0.2% GO



شکل ۷- نتایج آزمون ضربه نمونه های FDM و FGF

۳-۴- تحلیل میکروسکوپ الکترونی FESEM

در این بخش تصاویر میکروسکوپ الکترونی FESEM از مقطع شکست نمونه های چاپ شده آزمون کشش در شکل ۸ نشان داده شده و تفسیر آن ها نیز بیان شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانوذرات به طور نسبتاً یکنواخت در ماتریس ABS پراکنده شده اند. تصاویر FESEM نمونه های هیبریدی CNT/GO، حضور مکانیسم های پل زنی ترک و انحراف ترک را تأیید کردند. نانولوله های کربنی باعث ایجاد پل بین ترک ها شده و صفحات GO مسیر شکست را منحرف کردند، که منجر به افزایش همزمان استحکام و چقرمگی نمونه ها گردید. همچنین در نمونه های با نسبت نابرابر GO و CNT، تجمع موضعی نانوذرات مشاهده شد که می تواند به کاهش خواص مکانیکی در مقایسه با نمونه های بهینه منجر شود.



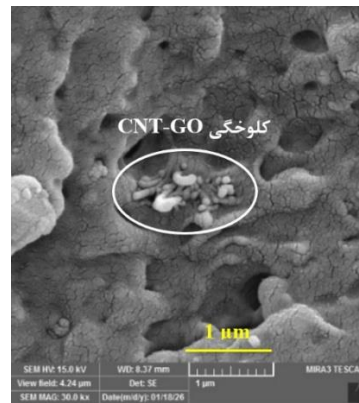
(الف) مقطع شکست ABS بدون افزودنی

می‌شوند؛ و دیگری، انحراف مسیر ترک توسط صفحات GO که با تغییر جهت ترک در اطراف صفحات صلب، مسیر شکست را طولانی‌تر کرده و انرژی بیشتری جذب می‌نمایند. در ترکیب متوازن، این دو مکانیزم به‌طور هم‌زمان فعال شده و یک شبکه سه‌بعدی همگن از نانولوله‌ها و صفحات GO تشکیل می‌دهند که در آن CNT ها به عنوان پل‌های اتصال بین صفحات GO عمل می‌کنند. این شبکه یکپارچه، توزیع تنش را در سراسر ماتریس بهینه کرده و از تمرکز تنش در نقاط خاص جلوگیری می‌نماید. در مقابل، در ترکیبات با نسبت نابرابر (غلبه یک نوع پرکننده)، پدیده‌هایی نظیر انباشتگی صفحات GO در ترکیب GO غالب (یا درهم‌تنیدگی نانولوله‌ها) در ترکیب CNT غالب (باعث کاهش سطح مؤثر تماس و ایجاد نقاط تمرکز تنش شده و عملکرد مکانیکی را تضعیف می‌کنند).

د) رهنمودهای عملی برای کاربردهای صنعتی: بر اساس یافته‌های این پژوهش، ترکیب بهینه $0.15\% \text{CNT} + 0.15\% \text{GO}$ با مجموع وزنی فقط 0.3% ، ضمن حفظ هزینه‌های پایین مواد اولیه، می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی برای تولید قطعات ABS با استحکام بالا در صنایع خودروسازی، هوافضا و کالاهای مصرفی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین روش FGF با حذف مرحله فیلامنت‌سازی، زمان و هزینه تولید را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و امکان استفاده از مواد بازیافتی را فراهم می‌آورد. با این حال، برای بهره‌مندی کامل از پتانسیل روش FGF در ترکیبات با نسبت‌های نابرابر، نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند (مانند دمای نازل، سرعت چاپ و فشار اکستروژن) در پژوهش‌های آتی احساس می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که تأثیر هم‌زمان پارامترهای فرآیند چاپ و نسبت‌های مختلف نانوپرکننده‌ها بر خواص مکانیکی و ریزساختاری در قالب یک مطالعه جامع طراحی آزمایش‌ها (DOE) مورد بررسی قرار گیرد تا امکان دستیابی به خواص بهینه برای کاربردهای خاص فراهم آید.

مراجع

- [1] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering. 2018 Jun;143:172-96.
- [2] Torrado Perez AR, Roberson DA, Wicker RB. Fracture behavior of ABS material processed by fused deposition modeling. Additive Manufacturing. 2014 Oct;2:180-8.
- [3] Rankouhi B, Javadpour S, Delfanian F, Letcher T. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2016 Jun;16(3):467-81.
- [4] Ahn S, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal. 2002 Oct;8(4):248-57.
- [5] Duty CE, Kunc V, Compton B, Post B, Erdman D, Smith R, Lind R, Lloyd P, Love L. Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM). Additive Manufacturing. 2017 Aug;16:1-9.
- [6] Love LJ, Kunc V, Rios O, Duty CE, Elliott AM, Post BK, Smith RJ, Blue CA. The importance of pellet-based feedstock in additive manufacturing. Additive Manufacturing. 2015 Oct;8:80-90.
- [7] Singh P, Singari RM, Mishra RS. FDM 3D printing of MWCNT reinforced ABS nanocomposites with



(و) مقطع شکست ABS با افزودنی $0.1\% \text{GO} + 0.2\% \text{CNT}$

شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر افزودن نانوپرکننده‌های هیبریدی (نانولوله‌های کربنی عامل‌دار و نانوصفات اکسید گرافن) بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ABS تولیدشده به دو روش اکستروژن سه‌بعدی FDM و FGF مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمون‌های مکانیکی و تصاویر ریزساختاری، دستاوردهای اصلی این تحقیق را می‌توان در چهار محور زیر خلاصه نمود:

الف) معرفی ترکیب بهینه نانوپرکننده: ترکیب هیبریدی متوازن با درصد‌های مساوی $0.15\% \text{CNT} + 0.15\% \text{GO}$ به عنوان بهترین فرمولاسیون از نظر خواص مکانیکی شناسایی شد. این ترکیب، بیشترین بهبود را در استحکام کششی 38% افزایش نسبت به ABS خالص در روش FDM و مدول خمشی 44% افزایش در روش FGF ایجاد نمود. همچنین مقاومت به ضربه در این ترکیب تا 44% بهبود یافت. این بهبود هم‌زمان در استحکام، سفتی و چقرمگی، بیانگر اثر هم‌افزایی (Synergy) مطلوب بین دو نوع نانوپرکننده است که در نسبت‌های نابرابر (غلبه یک نوع پرکننده) قابل دستیابی نبود.

ب) مقایسه عملکرد روش‌های ساخت FDM و FGF: اگرچه روش FDM به دلیل جهت‌گیری ناشی از مرحله فیلامنت‌سازی، خواص کششی و خمشی بالاتری ارائه داد، روش FGF با حذف این مرحله پرهزینه و زمان‌بر، خواص مکانیکی قابل قبول و نزدیک به FDM (با اختلاف کمتر از 15% در استحکام کششی) از خود نشان داد. با توجه به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی روش FGF (حذف مصرف انرژی و تجهیزات فیلامنت‌سازی، کاهش ضایعات و امکان استفاده مستقیم از گرانول‌های بازیافتی)، این روش می‌تواند گزینه‌ای عملی و مقرون‌به‌صرفه برای تولید قطعات مهندسی با استحکام متوسط تا بالا باشد. همچنین مشخص شد که انتخاب روش ساخت، تأثیر چشمگیری بر عملکرد ترکیبات با نسبت‌های نابرابر دارد؛ به‌گونه‌ای که ترکیب CNT غالب در FDM بهترین عملکرد خمشی و ترکیب GO غالب در FGF، بهترین عملکرد خمشی را نشان دادند.

ج) تبیین مکانیزم‌های ریزساختاری تقویت: تصاویر میکروسکوپ الکترونی FESEM وجود دو مکانیزم اصلی تقویت را تأیید کردند: یکی پل‌زنی ترک توسط نانولوله‌های کربنی که با اتصال دو لبه ترک، از انتشار آن جلوگیری کرده و باعث افزایش استحکام و چقرمگی

- manufacturing. *Composites Science and Technology*. 2014 Dec;105:144-50.
- [23] Yang T, Zhang P, Liu D, Bai H. Optimization of FDM process parameters: A review. *Rapid Prototyping Journal*. 2018 Jan;24(1):123-45.
- [24] Yao T, Ye J, Deng Z, Zhang K, Ma Y, Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering*. 2020 May;188:107894.
- [25] Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*. 2017 Jun;124:143-57.
- [26] Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. Interlayer bonding in additive manufacturing of polymers. *Materials & Design*. 2017 Jun;124:1-10.
- [27] Spinelli G, Kopp R, Schneider M. Effect of process parameters on mechanical properties of FDM parts. *Procedia CIRP*. 2019 Jan;79:231-6.
- [28] Koloor SSR, Radzuan NAM, Ayatollahi MR, Tamin MN. Mechanical anisotropy in fused deposition modeling. *Materials & Design*. 2016 Apr;95:1-10.
- [29] Wang K, Li S, Rao Y, Wu Y, Peng Y, Yao S, Zhang H, Ahzi S. Flexure Behaviors of ABS-Based Composites Containing Carbon and Kevlar Fibers by Material Extrusion 3D Printing. *Polymers*. 2019 Nov;11(11):1878.
- [30] Vidakis N, Mangelis P, Petousis M, Mountakis N, Moutsopoulou A, Maravelakis E. Mechanical Reinforcement of ABS with Optimized Nano Titanium Nitride Content for Material Extrusion 3D Printing. *Nanomaterials*. 2023 Feb;13(4):669.
- enhanced mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019 Jan;37:201-10.
- [8] Dul S, Fambri L, Pegoretti A. Filaments Production and Fused Deposition Modelling of ABS/Carbon Nanotubes Composites. *Nanomaterials*. 2018 Jan;8(1):49.
- [9] Jyoti J, Arya AK, Chockalingam S, Yadav SK, Subhedar KM, Dhakate SR, Singh BP. Mechanical, electrical and thermal properties of graphene oxide-carbon nanotube/ABS hybrid polymer nanocomposites. *Journal of Polymer Research*. 2020 Sep;27(9):282.
- [10] Vidakis N, Maniadi A, Petousis M, Vamvakaki M, Kenanakis G, Koudoumas E. Mechanical and Electrical Properties Investigation of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Graphene and Carbon Nanocomposites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Mar;29(3):1909-19.
- [11] Dul S, Gutierrez BJA, Pegoretti A, Alvarez-Quintana J, Fambri L. 3D printing of ABS Nanocomposites. Comparison of processing and effects of multi-wall and single-wall carbon nanotubes on thermal, mechanical and electrical properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022 Aug;121:52-66.
- [12] Thaler D, Aliheidari N, Ameli A. Mechanical, electrical, and piezoresistivity behaviors of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene/carbon nanotube nanocomposites. *Smart Materials and Structures*. 2019 Jul;28(8):084004.
- [13] Le TH, Le VS, Dang QK, Nguyen MT, Le TK, Bui NT. Microstructure evaluation and thermal-mechanical properties of ABS/MWCNT filaments. *Applied Sciences*. 2021;11(19):8798.
- [14] Spoerk M, Savandaiah C, Arbeiter F, Traxler G, Cardon L, Holzer C, Sapkota J. Anisotropic properties of oriented short carbon fibre filled polypropylene parts fabricated by extrusion-based additive manufacturing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018 Oct;113:95-104.
- [15] Dul S, Fambri L, Pegoretti A. Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016 Jun;85:181-91.
- [16] Farajian J, Alipanahi A, Mahboubkhah M. Analyses of mechanical properties and morphological behavior of additively manufactured ABS polymer, ABS/PBT blend, and ABS/PBT/CNT nanocomposite parts. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2023 Jun;36(6):2390-411.
- [17] Mohammadsalih Z, Sapuan SM. Investigation of the structure-property relation for graphene oxide based acrylonitrile butadiene styrene nanocomposites. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2024 Jul;32(7):690-700.
- [18] Ding Y, Jiang Y, Wu F, Zhang R. Recent advances on 3D printing graphene-based composites. *Nano Materials Science*. 2019 Jun;1(2):101-15.
- [19] Rafiee MA, Rafiee J, Wang Z, Song H, Yu ZZ, Koratkar N. Graphene Nanocomposites for Improved Mechanical Performance. *ACS Nano*. 2009 Dec;3(12):3884-90.
- [20] Coleman JN, Khan U, Blau WJ, Gun'ko YK. Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*. 2006 Aug;44(9):1624-52.
- [21] Kim H, Abdala AA, Macosko CW. Graphene/Polymer Nanocomposites. *Macromolecules*. 2010 Aug;43(16):6515-30.
- [22] Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, Blue CA, Ozcan S. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive