



بررسی و مقایسه خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف ممتد ABS/GF و پلیمر ABS تولیدشده با روش لایه نشانی تجمعی مذاب

امیرمحمد منوچهری^۱، محمد گلزار^{۲*}، علی مسعودی^۳، هادی قربانی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، m.golzar@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ آذر ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۷ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۷ فروردین ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی

مواد ترموپلاستیک

چاپگر سهبعدی لایه نشانی تجمعی مذاب

کامپوزیت الیاف ممتد

مقاله پیش رو به بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف ممتد شیشه و ماتریس ترموپلاستیک ABS ساخته شده با روش ساخت افزایشی FDM پرداخته است. چاپگر طراحی شده برای تولید این کامپوزیت از فیلامنت پلیمری ABS و فیلامنت کامپوزیتی پیش آغشته ABS/GF استفاده می‌کند. فیلامنت پیش آغشته توسط یک خط تولید فیلامنت طراحی و تولید شده است. به منظور ساخت چاپگر سهبعدی با قابلیت چاپ کامپوزیت، یک چاپگر FDM به گونه‌ای تحت اصلاح قرار گرفت که توانایی چاپ کامپوزیت را داشته باشد. در نهایت بعد از ساخت چاپگر سهبعدی با قابلیت چاپ کامپوزیت، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمون کشش و خمش سه نقطه چاپ شد و آزمون خواص مکانیکی طبق استانداردهای موجود بر روی آن‌ها صورت گرفت. خواص به دست آمده با نمونه ABS خالص چاپ شده نیز مورد مقایسه قرار گرفت. مدول الاستیسیته و استحکام کششی نمونه ABS/GF نسبت به نمونه ABS خالص چاپ شده به ترتیب ۵۴۰ و ۲۶۰ درصد رشد داشته است. بر اساس آزمون خمش سه نقطه، مدول و استحکام خمشی کامپوزیت چاپ شده به ترتیب ۱۴۰ و ۱۰۰ درصد نسبت به نمونه خالص پلیمری افزایش پیدا کرده است. مدت زمان ساخت نمونه کامپوزیت به وسیله چاپگر FDM در مقایسه با چاپ پلیمری اختلاف چندانی ندارد اما به دلیل وجود الیاف ممتد شیشه یا سایر الیاف تقویت کننده، خواص مکانیکی نمونه ساخته شده، بهبود قابل توجهی پیدا کرده است؛ به همین دلیل استفاده از این روش در مقایسه با روش چاپ FDM با پلیمر خالص قابل توجه است.

Investigating and comparing the mechanical properties of ABS/GF continuous fiber composite and ABS polymer produced by fused deposition modeling method

Amir Mohammad Manouchehri, Mohammad Golzar*, Ali Masoudi, Hadi Ghorbani

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

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 4 December 2022
First Decision: 26 February 2023
Accepted: 27 March 2023

Keywords:

Additive manufacturing
Thermoplastic materials
Fused deposition modeling 3D printer
Continuous fiber composite

Abstract

The upcoming article investigates the mechanical properties of FDM printed composite material with continuous glass fibers and ABS matrix. The printer designed to produce this composite uses ABS polymer filament and ABS/GF pre-impregnated composite filament. Pre-impregnated filament is designed and produced by a filament production line. In order to build a 3D printer with composite printing capability, a normal FDM printer was subjected to modifications in the structure and nozzle. Finally, after building a 3D printer with composite printing capability, tensile and bending samples were printed and the mechanical properties were tested according to standard instructions. The obtained properties were also compared with the printed pure ABS sample. The modulus of elasticity and tensile strength of the ABS/GF sample has increased by 540% and 260%, respectively, compared to the printed pure ABS sample. Based on the three-point bending test, the modulus and flexural strength of the printed composite have increased by 140% and 100%, respectively, compared to the pure polymer sample. The duration of making composite by FDM printer is not much different compared to polymer printing, but due to the presence of continuous glass fibers or other reinforcing fibers it greatly improves the mechanical properties of the manufactured sample, that's why the use of this method can be justified compared to FDM printing with pure polymer method.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. M. Manouchehri, M. Golzar, A. Masoudi, H. Ghorbani, Investigating and comparing the mechanical properties of ABS/GF continuous fiber composite and ABS polymer produced by fused deposition modeling method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 26-34, 2022 (in Persian).
<https://www.doi.org/10.22034/ijme.2023.375334.1722>

۱- مقدمه

امروزه مواد کامپوزیت به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این میان کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ممتد دارای استحکام ویژه، سفتی ویژه و سهولت طراحی مناسب‌تری هستند. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ممتد را می‌توان به مواد مبتنی بر فلز، پایه سرامیکی و بر پایه رزین تقسیم کرد. مواد کامپوزیتی مبتنی بر رزین از زمان اختراع در دهه ۱۹۴۰ به شدت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و به طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی و تولید برق بادی [۱، ۲] استفاده می‌شوند. در صنعت هوافضا استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ممتد به یکی از نشانه‌های مهم پیشرفت صنایع هوایی تبدیل شده است [۳، ۴].

مواد کامپوزیت رایج بر اساس جنس ماتریس به دو دسته ترموست و ترموپلاستیک تقسیم می‌شوند. کامپوزیت‌های ترموپلاستیک چقرمگی شکست بالا و تحمل آسیب بهتری نسبت به کامپوزیت‌های ترموست دارند که منجر به وارد آمدن آسیب کمتری در ناحیه ضربه تحت همان انرژی ضربه می‌شود [۵]. یکی از خواص ویژه مواد پلیمری ترموپلاستیک امکان بازیافت آنان است در صورتی که در مواد ترموست این امکان وجود نداشته و زباله‌های آن به یک چالش جهانی تبدیل شده است. به دلیل قابلیت بازیافت این مواد، استفاده از آن‌ها در مواد کامپوزیت زمینه پلیمری رو به افزایش است [۶].

ساخت افزایشی^۱ به فرایند تولیدی گفته می‌شود که در آن مواد اولیه به هم متصل شده و بر اساس مدل سه بعدی طراحی شده در کامپیوتر، قطعه مورد نظر را تولید می‌کند. این روش برخلاف ساخت کاهشی، با اضافه کردن چندین لایه روی همدیگر، قطعه مورد نظر را تولید می‌کند [۷]. روش ساخت افزایشی در صنایع مختلفی مانند پزشکی [۸، ۹]، دندانپزشکی [۱۰]، صنایع غذایی [۱۱] و محصولات مصرفی روزمره [۱۲]، کاربرد پیدا کرده است. در ساخت افزایشی ابتدا باید مدل سه بعدی در فرمت‌هایی مثل STL، OBJ، AMF، DAE و 3MF طراحی یا به وسیله اسکن سه بعدی تهیه شود. مدل آماده شده توسط نرم‌افزارهای اسلایسر^۲ به صورت جی-کد^۳ تولید شده و آماده چاپ می‌شود. در این فرایند، مواد اولیه ذوب شده و روی لایه قبلی ریخته می‌شود و سپس سرد شده و به حالت جامد در می‌آیند و بدون استفاده از قالب‌های پیچیده، به هندسه‌های سه بعدی دست می‌یابند. فناوری‌های ساخت افزایشی که معمولاً

با عنوان چاپگر سه بعدی نامیده می‌شوند، شامل روش‌های مختلفی می‌شوند: دستگاه لیتوگرافی استریو^۴ (SLA) مبتنی بر پلیمریزاسیون با اشعه فرابنفش [۱۳]، ساخت اشیای چندلایه^۵ (LOM) بر اساس لایه گذاری پلاستیک [۱۴]، لایه نشانی زینتری^۶ (SLS) [۱۵] و مدل نمونه سازی تجمعی مذاب (FDM)^۷ بر اساس ذوب فیلامنت‌های پلاستیکی [۱۶].

در کاربردهای صنعتی از روش FDM به دلیل هزینه پایین دستگاه چاپگر، تنوع فیلامنت‌ها و قیمت پایین مواد اولیه، بیش از سایر روش‌های ساخت افزایشی استفاده می‌شود [۱۷]. با وجود کاربردهای گسترده چاپگرهای سه بعدی FDM، استحکام نمونه‌های چاپ شده ضعیف است و نمی‌توان قطعات تولید شده با این روش را در خیلی از موارد با قطعات تولید شده با روش تزریق پلاستیک جایگزین کرد. به منظور افزایش استحکام نمونه‌های ساخته شده با روش FDM، رویکردهای مختلفی پیشنهاد شده است [۱۸-۲۲].

چاپ سه بعدی کامپوزیت به روش FDM به دو دسته طبقه بندی می‌شود ۱- کامپوزیت‌های ترموپلاستیک تقویت شده با الیاف کوتاه^۸ (SFRT)، ۲- کامپوزیت‌های گرمنازم تقویت شده با الیاف پیوسته (بلند)^۹ (CFRT). در زمینه چاپ SFRT، بیشتر مطالعات بر اساس توسعه یک فیلامنت جدید، حاوی الیاف در مقیاس میکرو یا نانو است [۲۳، ۲۴]. خواص مکانیکی کامپوزیت‌های SFRT به طور کلی به طول و جنس الیاف بستگی دارد.

پرندوش و لین [۲۵] خواص فیلامنت ABS و کامپوزیت‌های ABS تقویت شده با الیاف شیشه کوتاه را به عنوان مواد اولیه ورودی در چاپگر FDM ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که استحکام نمونه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد در حالی که انعطاف پذیری کاهش پیدا کرده است.

سفتی نامناسب، نسبت استحکام به هزینه تولید پایین و همچنین محدودیت در افزایش بیش از حد الیاف کوتاه به یک ماتریس ترموپلاستیک باعث شده است که کامپوزیت‌های SFRT برای کاربردهای صنعتی که نیازمند به استحکام بالا هستند، مناسب نباشند؛ بنابراین محققان به دنبال توسعه کامپوزیت‌های CFRT با چاپگر سه بعدی FDM هستند. کامپوزیت‌های CFRT تولید شده با روش FDM دارای مزیت‌هایی مانند قابلیت بازیافت،

⁴ Stereo lithography apparatus

⁵ Laminated object manufacturing

⁶ Selective laser sintering

⁷ Fused deposition modeling

⁸ Short fiber reinforced thermoplastics

⁹ Continues fiber reinforced thermoplastics

¹ Additive manufacturing

² Slicer

³ G-code

۲- ساخت فیلامنت پیش آغشته

دقت ساخت قطعه مهم‌ترین متغیر در روش ساخت افزایشی است؛ بنابراین برای افزایش دقت چاپ در فرایند چاپ کامپوزیت باید قطر فیلامنت کوچک باشد زیرا در هنگام چاپ، مطابق شکل ۱ فیلامنت در سطح پهن می‌شود و اگر فیلامنت قطر بالایی داشته باشد، هنگام پهن‌شدگی فضای بیشتری اشغال کرده و در نتیجه دقت چاپ کاهش پیدا می‌کند. به این منظور می‌بایست روشی طراحی کرد که قطر خروجی را کاهش دهد و از پلیمری استفاده گردد که خواص چاپی بهتر و چسبندگی راحت‌تری داشته باشد.

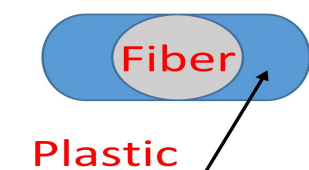


Fig. 1 Schematic of how fibers are spread

شکل ۱ شماتیکی از نحوه پهن شدن الیاف

الیاف ممتد شیشه برای تولید فیلامنت پیش آغشته الیاف‌دار استفاده شده است. پلیمرهای انتخاب شده به محفظه مذاب تزریق شده و طی فرایندی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، الیاف شیشه را آغشته می‌کنند (شکل ۲). در انتهای قطعه خروجی یک تنظیم‌کننده قطر فیلامنت تعبیه شده تا قطر فیلامنت الیاف‌دار خروجی در حدود ۰/۵ میلی‌متر قرار گیرد (شکل ۳). با مقایسه پلیمرهای مختلف در هنگام تولید فیلامنت الیاف‌دار این نتیجه حاصل شد که ویسکوزیته پلیمر مذاب ABS نسبت به پلیمرهای رایج برای چاپ مناسب‌تر است؛ به همین دلیل پلیمر ABS به‌عنوان پلیمر ورودی به محفظه مذاب استفاده شد. تعدادی از فیلامنت‌های تولید شده با این روش در رنگ مشکی و سفید در شکل ۴ قابل مشاهده است. فیلامنت الیاف‌دار تولید شده در این مرحله سفتی مناسبی داشته ولی در اثر خم شدن در شعاع خم‌های زیر ۰/۵ میلی‌متر دچار شکستگی می‌شود. همچنین درصد حجمی الیاف در فیلامنت تولید شده ۲۰ درصد است.

فیلامنت‌های تولید شده با استفاده از تکنیک مانت کردن، برای مشاهده در زیر میکروسکوپ آماده می‌شوند. قبل از مشاهده نمونه مانت شده در زیر میکروسکوپ می‌بایست، نمونه را صیقل داد تا به صافی سطح مناسب برسد. نمونه‌ها بعد از پولیش شدن با کاغذ سمباده و پارچه نمدی خیس، به صافی سطح مطلوب می‌رسند. در نهایت مانت‌های پولیش خورده در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این نمونه ۱۴ فیلامنت مختلف نمونه گذاری شده که برای بررسی در زیر میکروسکوپ آماده هستند.

هزینه کم و افزایش قابل توجه خواص مکانیکی هستند [۲۶، ۲۷]. بر اساس این ویژگی‌ها، می‌توان از کامپوزیت‌های CFRT در صنایع هوافضا استفاده کرد [۲۸، ۲۹]. به همین دلیل محققان به توسعه روش FDM برای تولید کامپوزیت‌های CFRT تشویق شده‌اند.

در سال ۲۰۱۴، در ایالات متحده اولین چاپگر سه‌بعدی FDM با قابلیت چاپ کامپوزیت ترموپلاستیک تقویت شده با الیاف ممتد کربن به مرحله ساخت رسید. این محصول در سال بعد تجاری‌سازی شد. ماده اولیه مورد استفاده در این چاپگر کامپوزیت ترموپلاستیک پلی‌آمید/کربن است [۳۰]. لیو و همکاران [۳۱] کوپن‌های آزمایشی ساخته شده از فیلامنت شیشه و فیبر کربن که توسط چاپگر FDM تهیه شده بود را بررسی کردند. این فیلامنت‌ها شامل الیاف کربن بوده که از قبل در پلیمر مذاب پلی-آمید آغشته شده است. آن‌ها دریافتند که نمونه‌های چاپ شده به دلیل ماهیت مستقل مواد عرضه شده، از نظر خواص مکانیکی نمی‌توانند با کامپوزیت‌های ترموست و مواد پیش آغشته معمولی رقابت کنند. این فرایند اجازه تشکیل ترکیب مناسب مواد را نمی‌دهد و باعث ایجاد تخلخل در قطعات تولید شده می‌شود. میکلسن و همکاران [۳۲] کامپوزیت‌های CFRT را مستقیماً از الیاف پیش آغشته شده تولید کردند. آن‌ها ادعا کردند که مشکل اتصال ضعیف الیاف/ماتریس را می‌توان در روش آغشته‌گری درجا حل کرد که در آن الیاف کربن خشک با ترموپلاستیک‌های ذوب شده در محفظه مذاب آغشته می‌شوند. جاستو و همکاران [۳۳] تأثیر آرایش الیاف بر خواص کششی کامپوزیت‌های CFRT را بررسی کردند و دریافتند که این پارامتر می‌تواند در خواص کامپوزیت تغییر چشمگیری داشته باشد.

مهم‌ترین ایراد روش ساخت افزایشی FDM، نرخ تولید پایین و ضعیف بودن مقاومت مکانیکی آن است؛ به همین دلیل امروزه پژوهش بر روی روش‌هایی که مقاومت قطعات تولید شده با این روش را افزایش دهد بسیار مورد توجه محققان است. پژوهش پیش رو نیز به مطالعه بر روی چاپگرهای FDM با قابلیت چاپ کامپوزیت می‌پردازد. هدف این پژوهش استخراج خواص مکانیکی نمونه کامپوزیتی چاپ شده با روش FDM و مقایسه آن با نمونه پلیمری خالص است. بدین منظور از دو آزمایش کشش (ASTM D3039) و خمش سه‌نقطه (ASTM D790) استفاده شده است. نمونه کامپوزیتی با ۱۰۰ درصد پرشدگی فیلامنت الیاف‌دار و نمونه پلیمری خالص با ۱۰۰ درصد پرشدگی پلیمر برای مقایسه، انتخاب شده‌اند. هر آزمایش سه بار تکرار خواهد شد و نتایج حاصل از آن مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار خواهد گرفت.

شکل ۵ سطح مقطع فیلامنت الیاف دار ABS با قطر ۰/۵ میلی متر را با بزرگنمایی ۱۰ برابر نشان می دهد. به دلیل شیوه فرایند تولید یعنی جدا بودن الیاف و پلیمر از یکدیگر، الیاف شیشه در کنار هم قرار گرفته است. این کنار هم بودن اگر با آغشته شدن مناسب همراه باشد، مشکلی در چاپ ایجاد نمی کند؛ زیرا اگر الیاف در کنار هم جمع شوند، در حین فرایند چاپ کردن پهن می شوند و در صورت آغشته بودن الیاف، در کنار یکدیگر به خوبی قرار می گیرند. از آنجایی که آغشته شدن الیاف به پلیمر قابل قبول است پس این فیلامنت الیاف دار برای چاپ کردن مناسب است.

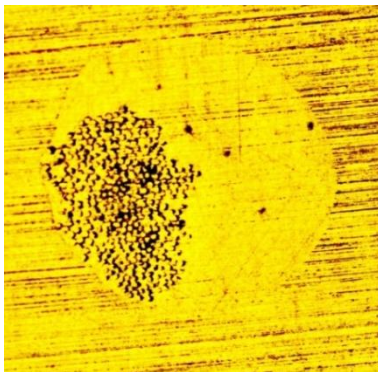


Fig. 5 The cross-sectional image of ABS/GF filament with a diameter of 0.5 mm and 10X magnification

شکل ۵ تصویر سطح مقطع فیلامنت ABS/GF با قطر ۰/۵ میلی متر و بزرگنمایی 10X

طبق شکل ۶ که سطح مقطع فیلامنت را در بزرگنمایی ۵۰ برابری نمایش می دهد، حفره هایی وجود دارد که ناشی از عدم وجود پلیمر می باشد. البته یک سری نقاط تیره رنگ در کنار بعضی الیاف دیده می شود که ناشی از لب پدیدگی الیاف در فرایند پولیش است؛ اما جدای از این نقاط، حفره های سیاه رنگی در کنار چند الیاف به هم چسبیده دیده می شود که ناشی از لب پدیدگی نمی باشد. این مناطق همان مناطق عدم آغشته شدن هستند که در این فیلامنت به نسبت کم هستند.

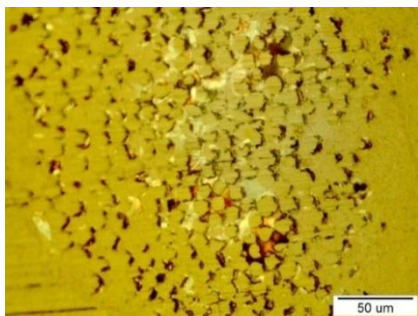


Fig. 6 The cross-sectional image of ABS/GF filament with a diameter of 0.5 mm and 50X magnification

شکل ۶ تصویر سطح مقطع فیلامنت ABS/GF با قطر ۰/۵ میلی متر با بزرگنمایی 50X

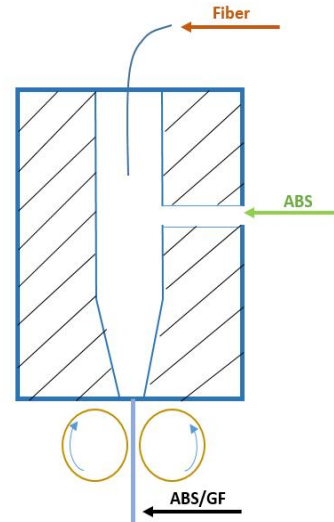


Fig. 1 The process of producing and impregnating fibrous filament

شکل ۱ فرایند تولید و آغشته شدن فیلامنت الیاف دار



Fig. 2 End shaper of fibrous filament

شکل ۲ شکل دهنده انتهایی فیلامنت الیاف دار

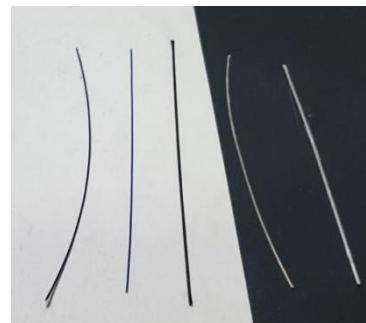


Fig. 3 Pre-impregnated fiber filaments produced for FDM printing

شکل ۳ فیلامنت های الیاف دار پیش آغشته تولید شده برای چاپ

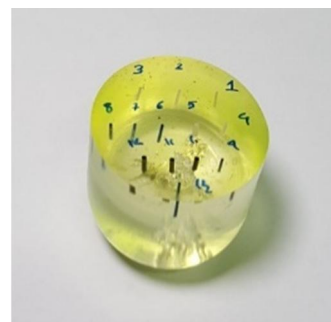


Fig. 4 Mounted sample of produced filaments

شکل ۴ نمونه مانت شده فیلامنت های تولید شده

۳- ساخت نمونه

است. نمونه کشش در ۵ لایه چاپ شده است. لایه بالایی و پایینی مدل با پلیمر چاپ شده است و بقیه لایه‌ها با کامپوزیت و درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد پر شده است. تصویری از فرایند چاپ نمونه کشش در شکل ۹ قابل مشاهده است. به دلیل دراز بودن نمونه و محدود بودن ابعاد کف چاپگر، نمونه در جهت قطر چاپ شده است و حدود ۷ متر فیلامنت الیافدار در آن مصرف شده است.

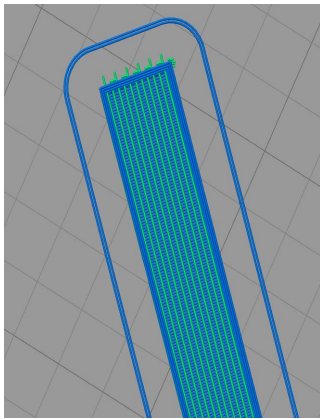


Fig. 8 Simulating the printing process, composite (green) and polymer (blue) raster

شکل ۸ شبیه‌سازی فرایند چاپ، لایه گذاری کامپوزیت (رنگ سبز) و پلیمر (رنگ آبی)

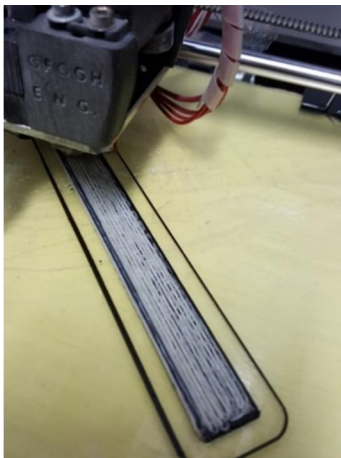


Fig. 9 Print model designed for tensile testing

شکل ۹ چاپ مدل طراحی شده برای آزمایش کشش

نمونه‌های چاپ شده به صورت یک قطعه مستطیلی می‌باشند در صورتی که برای انجام آزمایش کشش باید از ۴ عدد تب^۱ استفاده کرد. این تب‌ها فرایند درگیری فک‌های دستگاه کشش را با نمونه بهتر کرده و از تمرکز تنش در محل فک‌ها جلوگیری می‌کند. تب‌ها به وسیله استون و چسب قطره‌ای به نمونه کشش متصل شده و نمونه نهایی مورد نظر (شکل) آماده آزمون کشش می‌شود.

ساخت قطعات کامپوزیتی با چاپگر FDM نیازمند ایجاد تغییراتی در چاپگر است؛ به طور مثال چاپگر باید شامل دو نازل باشد. یک نازل صرفاً فیلامنت پلیمری را برای نواحی که نیاز به کامپوزیت نمی‌باشد، تزریق می‌کند و نازل دیگر فیلامنت الیافدار را در زمان مناسب استفاده می‌کند. از آنجایی که فیلامنت الیافدار باید به خوبی بر روی سطح پهن شود، نوع نازل استفاده شده برای آن با نازل‌های رایج متفاوت است. نازل‌های چاپ الیافدار باید دارای یک سطح برای اتو کردن الیاف باشند تا چسبندگی به لایه زیرین بهینه شده و آغستگی الیاف و پلیمر بهبود پیدا کند. نازل‌های تولید شده برای استفاده در این چاپگر در شکل ۷ قابل مشاهده است.



Fig. 7 Nozzles produced and suitable for printing with continuous fibers

شکل ۷ نازل‌های تولید شده و مناسب برای چاپ با الیاف ممتد

تهیه جی کد، بخش مهم دیگری در فرایند چاپ نمونه است. کد نوشته شده باید زمان تزریق هر دو نازل را به درستی محاسبه کند. جی کد استخراج شده از نرم‌افزارهای رایج اسلایسر به نرم‌افزار MATLAB منتقل شده و تغییرات لازم برای چاپ کامپوزیت بر روی آن صورت گرفته است. جی کد استخراج شده از نرم‌افزار MATLAB به چاپگر منتقل می‌شود و عملیات چاپ در آن انجام می‌شود. شبیه‌سازی چاپ لایه میانی نمونه کشش کامپوزیتی در شکل ۸ قابل مشاهده است. در این شبیه‌سازی قسمتی که با نازل پلیمری ساخته می‌شود با رنگ آبی و قسمتی که فیلامنت الیافدار در آن جانمایی می‌شوند با رنگ سبز نشان داده شده است.

محاسبه خواص فیزیکی مواد در محیط‌های علمی و صنعتی تابع یک سری آزمایش‌های استاندارد است. خواص فیزیکی مواد چاپ شده به وسیله استاندارد مشهور ASTM انجام خواهد شد. یکی از اصلی‌ترین آزمایش‌های خواص مکانیکی مواد، آزمایش کشش ماده است. آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM D3039 انجام شده است. طبق متن این استاندارد، نمونه کشش در مواد کامپوزیتی با مواد فلزی تفاوت دارد. ضخامت نمونه آزمایش ۱ میلی‌متر، عرض ۱۲/۷ میلی‌متر و طول آن ۱۸۰ میلی‌متر بوده

^۱ Tab



Fig. 13 Tensile samples after testing

شکل ۱۳ نمونه‌های کشش بعد از انجام آزمایش

خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها متأثر از خواص مواد تشکیل‌دهنده آن است. از آنجایی که الیاف شیشه ماده‌ای ترد و مقاوم‌تر از پلیمر ABS است، پس اضافه کردن الیاف ممتد در نمونه‌های کامپوزیتی علاوه بر افزایش استحکام، باعث تردتر شدن رفتار آن‌ها نسبت به حالت پلیمری می‌شود. مطابق شکل ۱۴ که رفتار نمونه‌ها در آزمون کشش در آن رسم شده است، نمونه پلیمری پس از گذر از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک شده و سپس شکست در آن رخ داده است. طولانی بودن ناحیه پلاستیک پلیمر خالص در این آزمایش نشان‌دهنده رفتار نرم و قابلیت جذب انرژی این ماده است. از آنجایی که الیاف شیشه تقریباً ناحیه پلاستیک ندارد و رفتار مواد ترد را از خود نشان می‌دهد؛ با اضافه شدن به پلیمر ABS باعث شده است تا ماده کامپوزیت ناحیه پلاستیک مشهودی نداشته باشد و مطابق رفتار ماده ترد رفتار کرده و بشکند؛ همچنین در ماده کامپوزیت به دلیل شکست در حالت ترد، رفتار گلوبی شدن در محل شکست مشاهده نشده است.

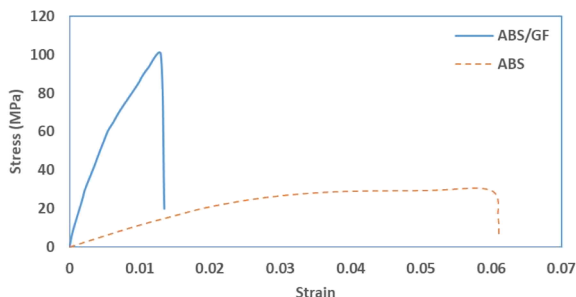


Fig. 11 Stress-Strain diagram of tensile test

شکل ۱۱ نمودار تنش- کرنش آزمون کشش

داده‌های کمی آزمون کشش در جدول ۱ آمده است. طبق این جدول میانگین مدول الاستیسیته، ۸/۹ گیگاپاسکال است.

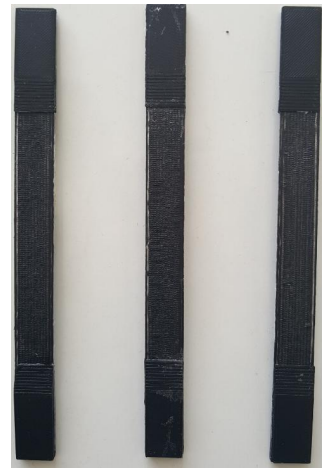


Fig. 11 Final sample for tensile test

شکل ۱۱ نمونه نهایی برای آزمایش کشش

مشابه آزمون کشش که از استاندارد ASTM استفاده شده بود، استاندارد ASTM D790 برای آزمون خمش مورد استفاده قرار گرفت که به آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای مشهور است و بر اساس اطلاعات موجود در متن این استاندارد، نمونه‌های آزمایش ساخته شده‌اند. تعداد ۳ نمونه پلیمری با درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد و ۳ نمونه کامپوزیتی با درصد پرشدگی ۱۰۰ درصد الیاف شیشه و ABS که لایه بیرونی آن توسط پلیمر پوشانده شده برای آزمایش ساخته شد. طول نمونه ساخته شده ۱۱۰، عرض ۱۲/۹ و ضخامت ۲/۸ میلی‌متر است. شکل ۱۰ نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. نمونه‌های سمت راست، فقط از ABS و نمونه‌های سمت چپ از ABS و شیشه ساخته شده‌اند.



Fig. 10 Specimens made for three-point bending test

شکل ۱۰ نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

۴- نتایج آزمایش

پس از انجام سه نمونه آزمایش کشش، سه قطعه همانند شکل ۱۳ از هم جدا شده‌اند. این نمونه‌ها بر حسب عدد از بالا به پایین شماره‌گذاری شده‌اند. نحوه اتصال تب در نمونه اول به وسیله چسب استون بوده ولی در دو نمونه دیگر به وسیله چسب قطره‌ای به هم چسبانده شده‌اند. شکل ۱۳ نمونه‌های کشش بعد از انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

کامپوزیتی دارای یک ناحیه کوچک پلاستیک بوده که ناشی از اثر لایه‌های پلیمری بیرونی قطعه است.

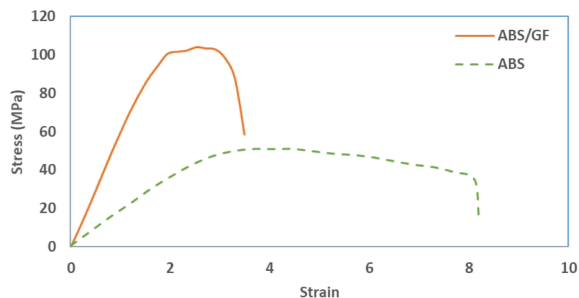


Fig. 13 Stress-Strain diagram of three-point bending test

شکل ۱۳ نمودار تنش- کرنش آزمون خمش سه نقطه

نتیجه آزمایش‌های انجام شده برای خواص مکانیکی در جدول ۲ ثبت شده است. در نمونه‌های پلیمری، مدول خمشی ۲/۰ گیگاپاسکال محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مدول خمشی ABS در کاتالوگ‌های این مواد ۲/۳ گیگاپاسکال است. این اختلاف به دلیل آن است که مدول گزارش شده در کاتالوگ برای ماده همگن تعریف شده است که با فرایندی نظیر تزریق تولید شده اما نمونه آزمایش شده با فرایند چاپ ساخته شده است که نوعی لایه چینی به شمار می‌رود و به تبع مدول خمشی آن باید از ماده که همگن تولید شده کمتر باشد.

مدول خمشی نمونه‌های کامپوزیتی نیز ۱۴۰ درصد نسبت به نمونه‌های پلیمری رشد داشته است. در نمونه‌های کامپوزیتی دو لایه پلیمری وجود دارد که همان سطوح بیرونی ماده بوده و این دو لایه قطعاً در مدول خمشی ماده کامپوزیتی نیز در مقایسه با می‌دهند. مقاومت خمشی ماده کامپوزیتی نیز در مقایسه با نمونه پلیمری، ۱۰۰ درصد افزایش داشته است. این نتیجه در تست کشش نیز صادق بود و تنش شکست ۱۰۴ مگاپاسکال گزارش شد که حاکی از صحت آزمایش است.

نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با نمونه‌های پلیمری از استحکام و سفتی بالاتری برخوردار هستند. این دو خصوصیت در کرنش شکست ماده تأثیرگذار بوده‌اند؛ به عبارتی احتمال اینکه ماده در کرنش پایین‌تری دچار شکست شود بیشتر شده و به تبع هر چه کرنش شکست پایین‌تر باشد، شکست تردتر است.

جدول ۲ نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای

Table 2 Three-point bending test results

آزمایش	مدول خمشی (GPa)	تنش شکست (MPa)	کرنش خمشی (%)
پلیمر	۲/۰±۰/۲	۵۱±۰/۸	۸/۱±۰/۱
کامپوزیت	۴/۸±۰/۵	۱۰۴±۱۲	۴/۱±۰/۱

تنش شکست نمونه‌ها ۱۰۴ مگاپاسکال بوده و در کرنش ۱/۲ درصد شکسته است. این مقادیر نسبت به نمونه پلیمری به ترتیب ۵۴۰، ۲۶۰ درصد رشد و ۸۰ درصد کاهش داشته است.

جدول ۱ نتایج تست کشش

Table 1 Tensile test results

آزمایش	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش شکست (MPa)	کرنش شکست (%)
پلیمر	۱/۴±۰/۱	۲۹±۲	۶/۰±۱/۰
کامپوزیت	۸/۹±۰/۲	۱۰۴±۳	۱/۲±۰/۵

شکل ۱۲ نمونه‌ها را بعد از انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل نمونه‌های کامپوزیتی در سمت چپ و نمونه‌های پلیمری در سمت راست قرار دارند. شکست نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با نمونه پلیمری تردتر است؛ بدین معنی که سفتی نمونه کامپوزیتی از پلیمری بیشتر است که از قبل نیز قابل پیش‌بینی بود.

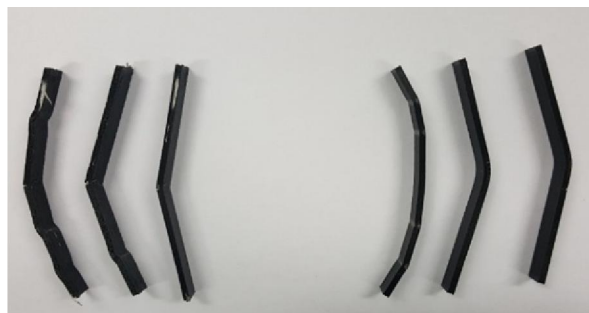


Fig. 12 Three-point bending test samples after testing

شکل ۱۲ نمونه‌های آزمون خمش سه نقطه‌ای بعد از انجام آزمایش

رفتاری که نمونه‌ها در آزمون کشش از خود نشان دادند در آزمون خمش سه نقطه‌ای نیز تکرار شده است. رفتار نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه پلیمری تردتر است ولی استحکام بیشتری دارد (شکل ۱۳). از این نمودار نتیجه می‌شود که عمده تنش تحمل شده توسط الیاف رخ داده است از آنجایی که الیاف شیشه، کرنش شکست پایینی دارد پس نمونه باید نسبت به حالت پلیمری خالص در کرنش کمتری شکسته شود و همچنین به دلیل اینکه الیاف شیشه محدوده پلاستیک خیلی کمی دارد، محدوده پلاستیک نمونه خمش نیز کاهش چشمگیری پیدا کرده است. در فرایند چاپ سه بعدی نمونه کامپوزیتی، لایه‌های بیرونی با پلیمر خالص پوشانده شده است تا زیبایی ظاهری قطعه حفظ شود. در خمش سه نقطه بیشترین تنش در لایه‌های بیرونی وارد می‌شود و این ناحیه با ماده نرم‌تری پر شده است؛ به همین دلیل نمونه

۵- نتیجه گیری

پژوهش انجام شده به بررسی خواص مکانیکی کششی و خمشی کامپوزیت ترموپلاستیک ABS/GF تولید شده با چاپگر سه بعدی FDM پرداخته است. چاپگر مناسب برای تولید کامپوزیت از اصلاح یک چاپگر سه بعدی FDM عادی ساخته شد. انجام تست کشش و خمش استاندارد بر روی نمونه های کامپوزیتی و مقایسه آن با نمونه های پلیمری چاپ شده نتایج زیر را حاصل کرد:

افزایش مدول الاستیسیته و استحکام کششی نمونه کامپوزیتی چاپ شده نسبت به نمونه پلیمری چاپ شده به ترتیب ۵۴۰ و ۲۶۰ درصد بوده است. افزایش مدول الاستیسیته کامپوزیت باعث تشدید ویژگی تردی ماده در شکست می شود به طوری که کرنش شکست کامپوزیت ۱/۲ درصد است در حالی که در پلیمر چاپ شده ۶ درصد می باشد.

آزمون خمش سه نقطه بر روی سه نمونه پلیمری و کامپوزیتی گرفته شده و مؤید استحکام قابل توجه نمونه کامپوزیتی نسبت به نمونه خالص پلیمری است. مدول و استحکام خمشی در نمونه کامپوزیتی به نسبت پلیمری به ترتیب ۱۴۰ و ۱۰۰ درصد افزایش داشته است؛ در حالی که مدت زمان مورد نیاز برای چاپ نمونه کامپوزیتی اختلاف چندانی با نمونه پلیمری ندارد. در نتیجه استفاده از این روش تولید قابل توجیه اقتصادی و فنی است.

۶- مراجع

- [1] J. Tang, Development Status and Prospects of Aerospace Composite Materials, *Spacecraft Environmental Engineering*, pp. 352-359, 2013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/5/052038>
- [2] W. Zhuo, O. Feng, Application of advanced composite materials in aerospace, *New technology & new process*, vol. 10, pp. 76-79, 2012.
- [3] H. Zhao, X. Liu, W. Zhao, G. Wang, B. Liu, An Overview of Research on FDM 3D Printing Process of Continuous Fiber Reinforced Composites, in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1213, no. 5: IOP Publishing, p. 052037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1213/5/052037>
- [4] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui, 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 442-458, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- [5] X. Xu, Z. Zhou, Y. Hei, B. Zhang, J. Bao, X. Chen, Improving compression-after-impact performance of carbon-fiber composites by CNTs/thermoplastic hybrid film interlayer, *Composites science and technology*, vol. 95, pp. 75-81, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.023>
- [6] B. Alcock, N.O. Cabrera, N.M. Barkoula, Z. Wang, T. Peijs, The effect of temperature and strain rate on the impact performance of recyclable allpolypropylene composites, *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 537-547, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.03.003>
- [7] J. Joudaki, A. Naghavi Alhoseini, Comparison of Tensile Strength for 3D Printed Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling (FDM), *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 40-48, 2022. (in Persian) <https://doi.org/10.22034/ijme.2022.160058>
- [8] E. R. Ghomi, F. Khosravi, R. E. Neisiany, S. Singh, S. Ramakrishna, Future of additive manufacturing in healthcare, *Current Opinion in Biomedical Engineering*, vol. 17, pp. 100255, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2020.100255>
- [9] A. Standard, Standard terminology for additive manufacturing technologies, *ASTM International F2792-12a*, 2012.
- [10] A. Goyanes, A. B. Buanz, A. W. Basit, S. Gaisford, Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets, *International journal of pharmaceutics*, vol. 476, no. 1-2, pp. 88-92, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.09.044>
- [11] A. M. Hespel, R. Wilhite, J. Hudson, Invited review □ applications for 3d printers in veterinary medicine, *Veterinary Radiology & Ultrasound*, vol. 55, no. 4, pp. 347-358, 2014. <https://doi.org/10.1111/vru.12176>
- [12] Li, Dantong, Xiaobao Feng, Ping Liao, Hongjun Ni, Yidan Zhou, Mingyu Huang, Zhiyang Li, Yu Zhu. 3D reverse modeling and rapid prototyping of complete denture. In *Frontier and Future Development of Information Technology in Medicine and Education: ITME 2013*, pp. 1919-1927, 2014. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7618-0_226
- [13] M. Behzadnasab, M. Hosseini, Optimization of Physical-Mechanical Properties of light cure Resins for use in 3D printing by micro and nano additives for industrial applications, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 6, no. 8, pp. 33-42, 2020. (in Persian)
- [14] S. E. Hudson, Printing teddy bears: a technique for 3D printing of soft interactive objects, in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 459-468, 2014. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557338>
- [15] J. Wang, A. Goyanes, S. Gaisford, A. W. Basit, Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms, *International journal of pharmaceutics*, vol. 503, no. 1-2, pp. 207-212, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.03.016>
- [16] D. Ahn, J.-H. Kweon, J. Choi, S. Lee, Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 2, pp. 339-346, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.013>
- [17] S. Abidaryan, M. Barmouz, S. K. Hedayati, Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape

- [26] H. L. Tekinalp, V. Kunc, G. M. Velez-Garcia, C. E. Duty, L. J. Love, A. K. Naskar, C. A. Blue, S. Ozcan, Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing, *Composites Science and Technology*, vol. 105, pp. 144-150, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>
- [27] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, Z. Li, Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 301, no. 2, pp. 125-130, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01810-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01810-4)
- [28] X. Tian, T. Liu, Q. Wang, A. Dilmurat, D. Li, G. Ziegmann, Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Journal of cleaner production*, vol. 142, pp. 1609-1618, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.139>
- [29] N. Li, Y. Li, S. Liu, Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 238, pp. 218-225, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025>
- [30] D.-A. Türk, F. Brenni, M. Zogg, M. Meboldt, Mechanical characterization of 3D printed polymers for fiber reinforced polymers processing, *Materials & Design*, vol. 118, pp. 256-265, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.050>
- [31] S. Liu, Y. Li, N. Li, A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures, *Materials & Design*, vol. 137, pp. 235-244, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.007>
- [32] F. Ghebretinsae, O. Mikkelsen, A. Akessa, Strength analysis of 3D printed carbon fibre reinforced thermoplastic using experimental and numerical methods, in *IOP conference series: materials science and engineering*, vol. 700, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/700/1/012024>
- [33] J. Justo, L. Távara, L. García-Guzmán, F. París, Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites, *Composite Structures*, vol. 185, pp. 537-548, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.052>
- memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 14-23, 2020. (in Persian)
- [18] B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold, A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid prototyping journal*, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>
- [19] M. Heidari-Rarani, M. Rafiee-Afarani, A. Zahedi, Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Composites Part B: Engineering*, vol. 175, p. 107147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107147>
- [20] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 287-295, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>
- [21] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen, R. C. Advincula, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, *Additive manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- [22] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K.Y. Lee, V. L. Tagarielli, Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA, *Materials & Design*, vol. 123, pp. 154-164, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>
- [23] S. M. Mousavi Kani, M. Sadegh Yazdi, M. H. Hosseinzadeh, Influence of infill density and printing pattern on flexural properties of 3D printed short carbon fiber PLA composite, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 42-51, 2020. (in Persian)
- [24] A. Gholizadeh Roshan, A. Zolfaghari, M. Shakeri, Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 1-9, 2020. (in Persian)
- [25] P. Parandoush, D. Lin, A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites, *Composite Structures*, vol. 182, pp. 36-53, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>