



بررسی تجربی استحکام فشاری ماده مرکب پلی لاکتیک اسید/الیاف پیوسته شیشه تولید شده با چاپگر سه بعدی مبتنی بر روزن رانی با استفاده از سیستم آغشته سازی همزمان الیاف و پلیمر

امین صفی جهان شاهی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، کرمان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: jahanshahi@sirjantech.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با معرفی فرایندهای ساخت افزایشی و چاپگرهای سه بعدی، تحقیقات بسیار زیادی در این حوزه انجام گرفته و در حال انجام است. روش های مبتنی بر روزن رانی پلیمر که با نام لایه نشانی ذوبی شناخته می شود یکی از پرکاربردترین روش های ساخت افزایشی هستند. بیشترین تحقیقات انجام شده در روش لایه نشانی ذوبی، مربوط به افزایش خواص مکانیکی نمونه های چاپ شده است. بهینه سازی پارامترهای فرایند، افزودن ذرات پرکننده فلزی و غیرفلزی، استفاده از عملیات پس پردازشگر (انواع عملیات حرارتی، استفاده از امواج التراسونیک و غیره)، استفاده از الیاف پیوسته از اصلی ترین روش های به کار گرفته شده هستند. مؤثرترین روش در افزایش خواص مکانیکی به ویژه خواص مکانیکی کششی استفاده از الیاف پیوسته با استحکام بالا نظیر کربن، شیشه و آرامید است. البته استفاده از الیاف پیوسته طبیعی مانند کتان، کنف و غیره نیز مورد توجه بوده است. هدف از این پژوهش بررسی خواص فشاری نمونه های چاپ سه بعدی شده به روش لایه نشانی ذوبی است. در این راستا استحکام فشاری نمونه های پلیمری از جنس پلی لاکتیک اسید خالص و نیز نمونه مرکب پلی لاکتیک اسید/الیاف پیوسته شیشه مورد بررسی قرار می گیرد. واضح است که اگر الیاف پیوسته در راستای اعمال بار فشاری قرار گیرند، توانایی تحمل بار فشاری را ندارند. لذا در این پژوهش با قرار دادن الیاف در جهت عمود بر جهت اعمال بار و با توجه به پدیده ایجاد کرنشی عرضی، الیاف تحت کشش قرار گرفته و استحکام فشاری نمونه مرکب نسبت به نمونه پلیمری خالص به میزان ۱۰ درصد افزایش می یابد.

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۳ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۲ فروردین ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

ماده مرکب

ساخت افزایشی

چاپ سه بعدی

استحکام فشاری

الیاف پیوسته

Experimental investigation of the compressive strength of polylactic acid/continuous glass fiber composite material produced with an extrusion-based 3D printer using the simultaneous impregnation system of fibers and polymer

Amin Safi Jahanshahi*

Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Kerman, Iran

* Corresponding Author's Email: jahanshahi@sirjantech.ac.ir

Article Information

Abstract

Original Research Paper

Received: 12 February 2024

Accepted: 21 March 2024

Keywords:

Composite Material
Additive Manufacturing
3D Printing
Compressive Strength
Continuous Fibers

With the introduction of additive manufacturing processes and 3D printers, a lot of research has been done and is being done in this field. Methods based on polymer extrusion, known as fused deposition modeling, are one of the most widely used additive manufacturing methods. Most of the research done in the fused deposition modeling method is related to increasing the mechanical properties of the printed samples. Optimization of process parameters, addition of metal and non-metal filler particles, use of post-processing operations (types of heat treatment, use of ultrasonic waves, etc.), and use of continuous fibers are the main methods used. The most effective method for increasing mechanical properties, especially tensile mechanical properties, is the use of continuous fibers with high strength such as carbon, glass, and aramid. Of course, the use of continuous natural fibers such as linen, hemp, etc. has also been considered. This research aims to investigate the compressive properties of 3D-printed samples using the fused deposition modeling method. In this regard, the compressive strength of polymer samples made of neat polylactic acid and composite samples of polylactic acid/continuous glass fiber is investigated. It is clear that if the continuous fibers are placed in the direction of applying the compressive load, they are not able to withstand the compressive load. Therefore, in this research, by placing the fibers in the direction perpendicular to the direction of the load and considering the phenomenon of transverse strain, the fibers are subjected to tension, and the compressive strength of the composite sample increases by 10% compared to the pure polymer sample.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Safi Jahanshahi A. Experimental investigation of the compressive strength of polylactic acid/continuous glass fiber composite material produced with an extrusion-based 3D printer using the simultaneous impregnation system of fibers and polymer. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 March 20;11(1):51-60. doi: 10.22034/IJME.2024.442326.1929 [In Persian]

۱- مقدمه

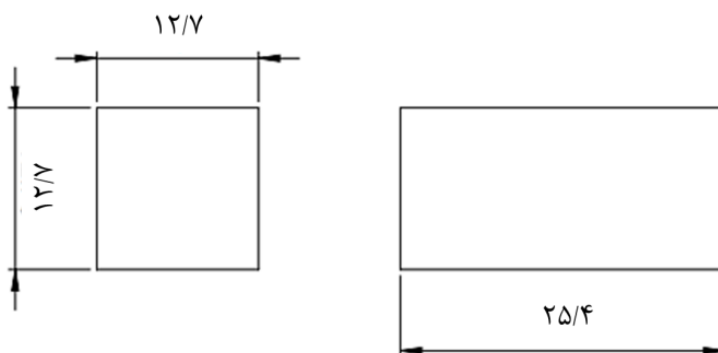
ساخت افزایشی، یک فناوری به سرعت در حال گسترش است که امکان چاپ اشکال با هندسه پیچیده که تولید آن‌ها با روش‌های سنتی چالش برانگیز یا غیرممکن است، را فراهم می‌کند. چاپ سه بعدی، نقش مهمی در انقلاب صنعتی چهارم ایفا می‌کند [۱]. مزایای پرینت سه بعدی شامل ساخت محصولاتی با شکل هندسی پیچیده و به صورت سفارشی، انعطاف پذیری، نمونه سازی محصول بعد از طراحی، مدیریت قطعات یدکی، کاهش زمان تحویل و شیوه‌های سازگار با محیط زیست است [۲]. فرایند لایه نشانی ذوبی یکی از محبوب‌ترین و کم هزینه‌ترین فن‌آوری‌های ساخت افزایشی است [۳]. در سال‌های اخیر، تمرکز فزاینده‌ای بر تولید محصول با استفاده از فرایند لایه نشانی ذوبی صورت گرفته است [۴]. بهبود خواص مکانیکی محصولات چاپ شده به روش لایه نشانی ذوبی همیشه مورد توجه محققین بوده است [۵]. روش‌های متفاوتی برای استحکام بخشی مطرح هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از: بهینه سازی پارامترهای فرایند، افزودن مواد پرکننده (الیاف کوتاه، نانو الیاف، پودر فلز و غیره)، به کارگیری عملیات پس پردازشگر بر روی نمونه‌ها و استفاده از الیاف پیوسته [۶]. بدیهی است که با بهینه سازی پارامترهای فرایند و همچنین عملیات پس پردازشگر حداکثر می‌توان به استحکام قطعه تزریقی و یا ماشین کاری شده رسید [۷]. نتایج حاصل از افزودن مواد پرکننده هم نشان می‌دهد که افزودن مواد پرکننده سبب تغییر چشمگیری در خواص مکانیکی نمی‌شود [۶]. همچنین افزودن ذرات پرکننده ممکن است سبب ترد شدن و شکنندگی فیلامنت، ایجاد فضاهای خالی و تمرکز تنش در قطعه تولیدی و گرفتگی نازل شود. یکی از مؤثرترین روش‌ها در استحکام بخشی به محصول‌های پلیمری افزودن الیاف پیوسته به آن به منظور تولید محصولی مرکب است که به مقدار زیادی، سبب افزایش خواص مکانیکی به ویژه خواص کششی می‌گردد [۸، ۹]. بیشتر تحقیقات انجام شده معطوف به بررسی خواص کششی و خمشی بوده است و تحقیقات کمتری در ارزیابی خواص مکانیکی فشاری قطعات چاپ شده انجام شده است. محمدی زاده و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای را در مورد مقایسه خواص مکانیکی نایلون خالص و کامپوزیت‌های نایلونی تقویت شده با فیبر کربن انجام دادند. در بررسی آن‌ها، محتوای فیبر کربن در کامپوزیت ۸ درصد وزنی بود. نتایج تجربی نشان داد که خواص کششی و خمشی قطعات کامپوزیتی نایلونی تقویت شده با فیبر کربن کوتاه نسبت به قطعات نایلونی خالص برتری دارد. با این حال، استحکام و مدول فشاری در مقایسه با نایلون خالص کمتر بود. آریا-کالوو و همکاران [۱۱] اثرات الگوی تقویت، جهت تقویت، جهت ساخت و حجم الیاف را بر روی خواص فشاری و خمشی قطعات کامپوزیت پلی آمید تقویت شده با فیبر کربن چاپ سه بعدی شده توسط فرایند لایه نشانی ذوبی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که توزیع تقویت کننده و برهمکنش‌های آن‌ها به طور قابل توجهی بر مدول فشاری تأثیر می‌گذارد. آلودی و همکاران [۱۲] مطالعه‌ای بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های پلی لاکتیک اسید با استفاده از الگوهای پرکننده مختلف مانند مثلثی، شبکه‌ای، سه ضلعی و مکعبی انجام داد. الگوی شبکه بالاترین استحکام فشاری به میزان ۷۲ مگاپاسکال را نشان داد. علاوه بر این، استحکام کششی نهایی در زاویه رشته صفر درجه به حداکثر رسید و زاویه شطرنجی ۴۵ درجه منجر به بالاترین استحکام خستگی شد. عملیات حرارتی همچنین بر روی رشته‌های کامپوزیتی انجام شد که منجر به بهبود کشش بین لایه‌های برای مواد پلی اتیلن گلیکول و پلی لاکتیک اسید تقویت شده از فیبر کربن شد [۱۳]. عملیات حرارتی منجر به بلورینگی ۳۰٫۲٪ برای پلی اتیلن گلیکول شد که در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸ ساعت آنیل شد. به طور مشابه، عملیات حرارتی تأثیر مثبتی بر افزایش درصد کریستالی، خواص مکانیکی و حرارتی رشته‌های قدیمی پلی لاکتیک اسید و کامپوزیت‌های آن‌ها داشت [۱۴]. علاوه بر این، عملیات حرارتی در دماهای ۲۰۰ درجه سانتی گراد و ۳۰۰ درجه سانتی گراد استحکام فشاری داربست‌های از جنس پلی اتراکتون چاپ شده با چاپ سه بعدی را تا ۱۴ درصد افزایش داد [۱۵]. پاژامانیل و همکاران [۱۶] تأثیر پارامترهای مختلف فرایند، از جمله درصد پر شدن، الگوی پر شدن، ارتفاع لایه، دمای نازل، و سرعت چاپ را بر روی استحکام کششی و فشاری نمونه‌های پلی لاکتیک اسید مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که بالاترین استحکام کششی به میزان ۲۷٫۸۷ مگاپاسکال در درصد پر شدن ۹۰، الگوی ژیروید، ضخامت لایه ۰٫۱ میلی متر، دمای نازل ۲۲۰ درجه سانتی گراد و سرعت چاپ ۳۰ میلی متر بر ثانیه به دست آمد. به طور مشابه، حداکثر استحکام فشاری ۳۸٫۲۱ مگاپاسکال در درصد پر شدن ۹۰، الگوی مثلثی، ضخامت لایه ۰٫۱ میلی متر، دمای نازل ۲۲۰ درجه سانتی گراد و سرعت چاپ ۳۰ میلی متر بر ثانیه به دست آمد. محققان همچنین عملیات حرارتی را به عنوان یک روش پس پردازشگر برای بهبود خواص مکانیکی بررسی کردند. آن‌ها تأثیر دماهای مختلف (۶۵ درجه سانتی گراد، ۹۵ درجه سانتی گراد و ۱۲۵ درجه سانتی گراد) و زمان (۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه) را بر

خواص مکانیکی بررسی کردند. در نتیجه، استحکام کششی نهایی ۲۵,۲۶ درصد بهبود نشان داد و به ۳۴,۹۱ مگاپاسکال رسید، در حالی که استحکام فشاری ۲۱,۸۷ درصد افزایش یافت و به ۴۶,۵۷ مگاپاسکال رسید.

با بررسی مراجع پیشین و تحقیقات انجام گرفته می توان گفت که تمرکز اصلی آن ها به بررسی تأثیر پارامترها و تکنیک های پس پردازش بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ شده سه بعدی و همچنین اثرات مثبت عملیات حرارتی بر خواص محصولات چاپ شده است. به طور کلی، اهمیت اصلی بهینه سازی پارامترهای فرایند و بررسی تأثیر آن ها بر خواص مکانیکی است. لذا در این پژوهش هدف اصلی بررسی استحکام فشاری استحکام فشاری نمونه های پلیمری از جنس پلی لاکتیک اسید خالص و نیز نمونه مرکب پلی لاکتیک اسید/الیاف پیوسته شیشه است. واضح است که الیاف در کشش باعث افزایش خواص مکانیکی می شوند ولی می توان با قرار دادن الیاف در جهت عمود بر جهت اعمال بار و با توجه به پدیده ایجاد کرنشی عرضی، الیاف را تحت کشش قرارداد و افزایش استحکام فشاری را سبب گردید.

۲- مواد، تجهیزات و روش ها

در این پژوهش برای چاپ سه بعدی ماده مرکب از فیلامنت پلی لاکتیک اسید (ساخت شرکت سیزان) و نخ شیشه با استحکام کششی ۹۳۵ مگاپاسکال و مدول کششی ۵۶,۶۷ گیگاپاسکال استفاده می شود. تکس نخ مورد استفاده ۸۰۰ بوده و با توجه به اینکه قطر الیاف شیشه ۸ میکرومتر است قطر نخ شیشه ۰/۲۲ میلی متر است [۱۷]. کرنش شکست الیاف شیشه مورد استفاده ۱,۶۵ درصد است. از روش آغشته سازی هم زمان پلیمر و الیاف برای چاپ نمونه ها استفاده می شود. نمونه های چاپ شده بر اساس استاندارد ASTM D695 چاپ می شوند (شکل ۱). نتایج حاصل شده میانگین مقدار حاصل شده از ۵ نمونه است.

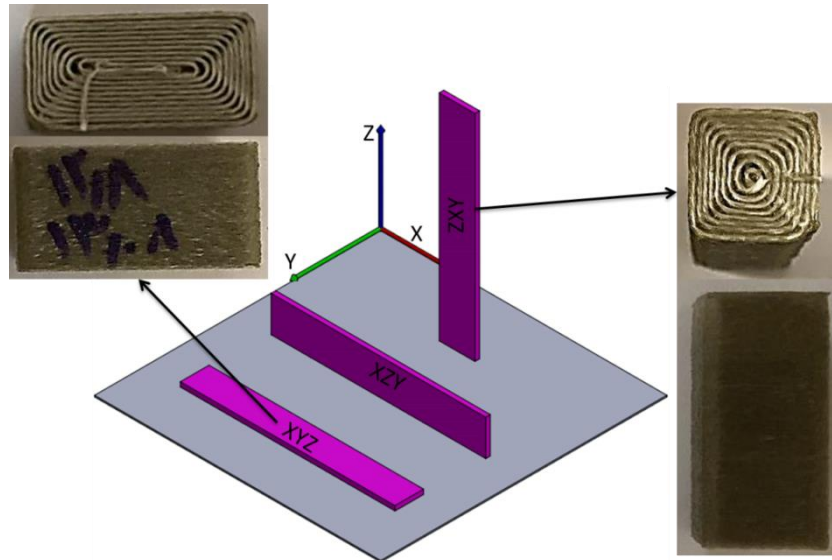


شکل ۱ نمونه استاندارد آزمون فشار (ابعاد بر حسب میلی متر است)

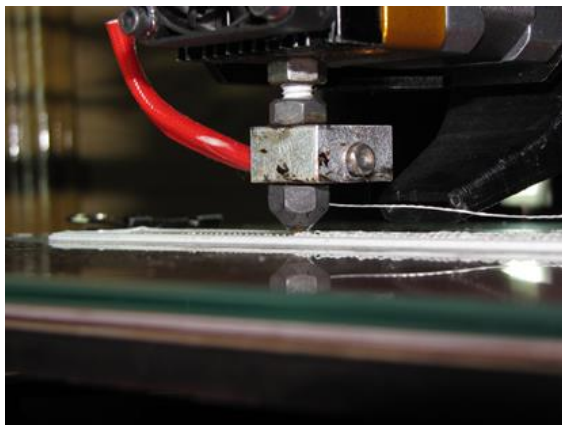
برای چاپ نمونه های پلیمری و مرکب از الگوی هم مرکز استفاده می شود. با توجه به کوچک بودن مقطع نمونه تنها الگوی ممکن برای لایه نشانی الیاف پیوسته الگوی هم مرکز است [۱۷]. همچنین برای متفاوت بودن راستای رشته ها و الیاف (موازی و عمود بر راستای اعمال بار) از دو جهت ساخت متفاوت برای چاپ سه بعدی نمونه ها استفاده می گردد (شکل ۲). در چاپ سه بعدی به روش لایه نشانی ذوبی پارامتری به نام جهت ساخت^۱ وجود دارد که این سه جهت عبارتند از: XYZ, XZY و ZXY. در این نام گذاری حرف اول بیان گر بیشترین اندازه و حرف آخر بیان گر کوچک ترین اندازه یا ابعاد قطعه است.

چاپگر سه بعدی مورد استفاده کوآنتوم ۲۰۲۰ است. برای ارزیابی خواص مکانیکی فشاری از دستگاه سنتام ۱۵۰ استفاده می شود. میکروسکوپ الکترونی روبشی (پراکس فینام، ساخت کشور هلند) برای مشاهده مقطع شکست نمونه ها استفاده می شود. برای آغشته سازی هم زمان الیاف و پلیمر از روش آغشته سازی هم زمان الیاف و پلیمر استفاده می شود. در این روش مسیر ورود الیاف از فیلامنت متفاوت است و الیاف بعد از ذوب شدن فیلامنت با پلیمر مذاب تماس پیدا می کنند [۱۷، ۱۸]. می توان مسیرهای متفاوتی را برای ورود الیاف در نظر گرفت. در این روش الیاف از سوراخ تعبیه شده در کنار نازل وارد ناحیه مذاب شده (شکل ۳) و بعد از آغشته سازی بر روی سطح نشانده می شوند [۱۷، ۱۸].

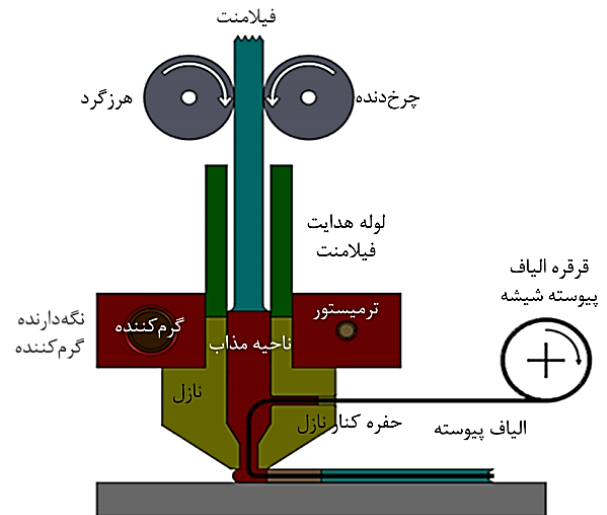
¹ Build Direction



شکل ۲ جهت ساخت نمونه‌های چاپ سه‌بعدی شده



(ب)



(الف)

شکل ۳ روش آغشته‌سازی هم‌زمان پلیمر و الیاف (الف) تصویر شماتیک، (ب) تصویر واقعی

نکته اصلی در این مکانیسم این است که به علت وجود الیاف مقدار مواد پلیمری که برای تولید یک قطعه لازم است، بایستی کاهش یابد. بنابراین مقدار پیشروی فیلامنت باید کاهش یابد. در هر خط از برنامه (جی‌کد) تولید قطعه به روش لایه نشانی ذوبی پارامتری به نام E وجود دارد. مقدار E بیان‌کننده میزان حرکت فیلامنت برحسب میلی‌متر است. به‌عنوان مثال عبارت $E2$ به معنای حرکت دو میلی‌متری فیلامنت به سمت نازل و عبارت $E-2$ به معنای حرکت دو میلی‌متری فیلامنت به سمت سیستم تغذیه است. مقدار E از رابطه ۱ [۱۸] محاسبه می‌شود.

$$E = (4 \cdot w \cdot h \cdot L) / (\pi D^2) \quad (1)$$

که در این رابطه w , h , L و D به ترتیب عرض روزن‌رانی، ارتفاع لایه‌ها، طول رشته لایه نشانی شده و قطر فیلامنت هستند. میزان کاهش پیشروی فیلامنت باید به‌طور صحیح محاسبه و اعمال گردد. زیرا اگر مقدار مواد پلیمری کمتر از حد محاسبه شده باشد، حفره‌های موجود در قطعه افزایش می‌یابد و اگر مقدار مواد پلیمری بیشتر از حد محاسبه شده باشد، افزایش فشار، آسیب دیدن الیاف، اثر منفی بر روی صافی سطح و غیره را به دنبال دارد [۱۷]. برای محاسبه میزان کاهش پیشروی فیلامنت از پارامتری به نام ضریب

روزن‌رانی استفاده می‌شود (رابطه ۲ [۱۸]). مقدار این پارامتر باید در مقدار پیشروی فیلامنت در هر خط از برنامه ضرب گردد. درصد حجمی الیاف با توجه به مقدار ضریب روزن‌رانی از رابطه ۳ [۱۸] به دست می‌آید.

$$F = (w \cdot h - \frac{\pi}{4} d_f^2) / (w \cdot h) \tag{2}$$

$$V_f = 1 - F \tag{3}$$

در این رابطه d_f قطر الیاف است. پارامترهای چاپ در جدول ۱ آمده است [۱۷]. با توجه به پارامترهای چاپ و روابط بیان شده درصد حجمی الیاف برابر با ۳۰ درصد است.

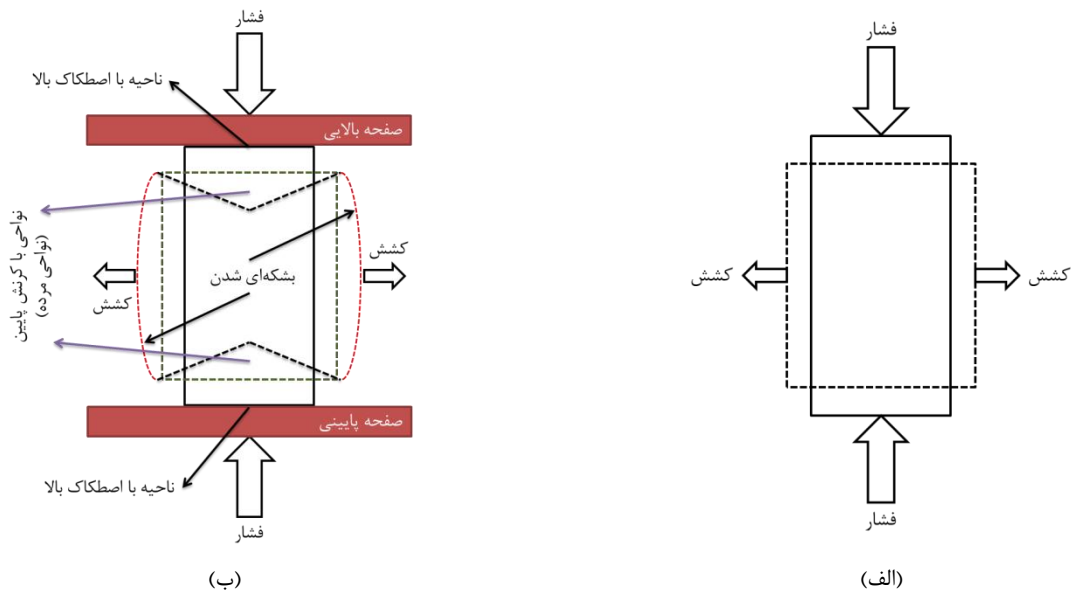
جدول ۱ پارامترهای چاپ

پارامتر	مقدار
دمای نازل	۲۲۰ درجه سانتی‌گراد
دمای بستر	۶۰ درجه سانتی‌گراد
قطر نازل	۰/۵ میلی‌متر
عرض روزن‌رانی	۰/۵۸ میلی‌متر
ارتفاع لایه‌ها	۰/۲۲ میلی‌متر
سرعت چاپ	۱۰ میلی‌متر بر ثانیه
ضریب روزن‌رانی	۰/۷
درصد حجمی الیاف	۳۰ درصد

در آزمون فشار تک‌محوره نیروی فشاری در راستای محور z به قطعه وارد شده و در نتیجه بر اساس قانون تعمیم‌یافته هوک (روابط ۴ [۱۹]) در راستای محورهای x و y قطعه تحت کرنش کششی قرار گرفته و در نتیجه کشش در این دو راستا وجود دارد (شکل ۴-الف).

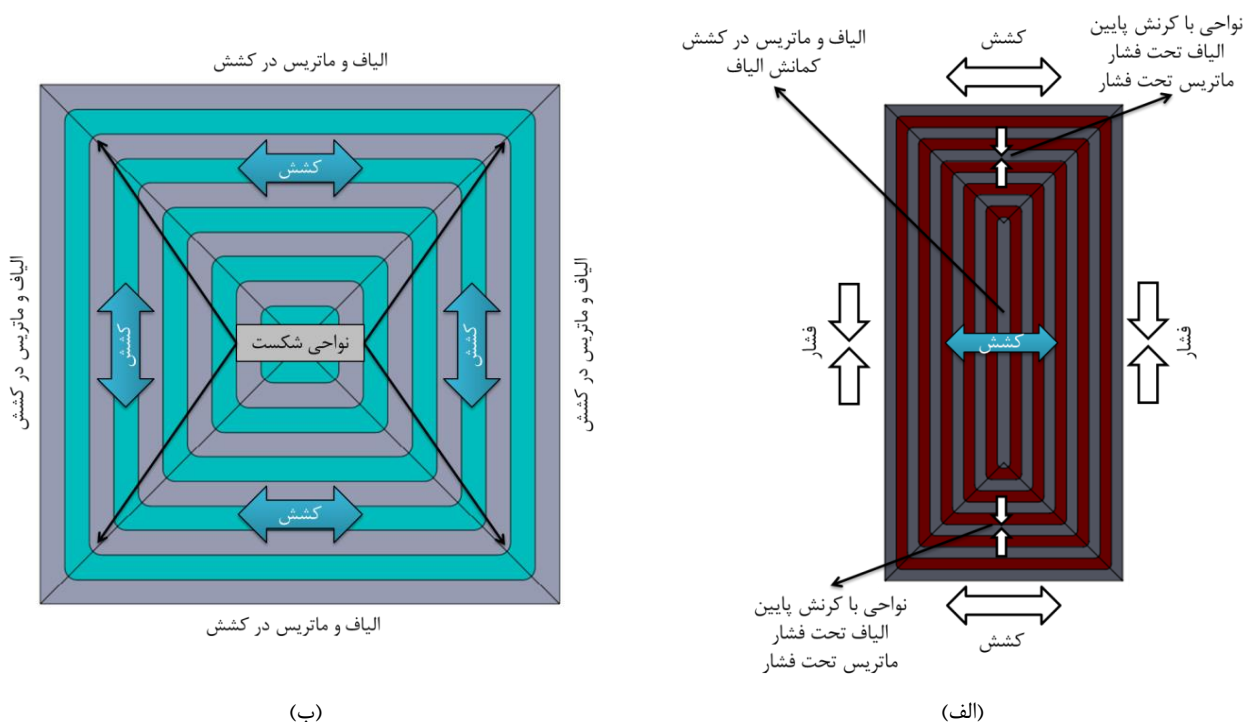
$$\begin{aligned} \epsilon_z &= \sigma_z / E \\ \epsilon_x &= -\nu \sigma_z / E \\ \epsilon_y &= -\nu \sigma_z / E \end{aligned} \tag{4}$$

که در این روابط ϵ کرنش، σ تنش، ν نسبت پواسون، E مدول الاستیسیته و اندیس‌های x ، y و z به ترتیب نشان‌دهنده راستاهای x ، y و z هستند. به دلیل اصطکاک بین صفحات دستگاه آزمون فشار و نمونه‌های آزمون فشار و ایجاد تنش برشی در ناحیه تماس، نمونه تحت کرنشی محدود بوده (ناحیه مرده) و قطعه حالت بشک‌های به خود می‌گیرد (شکل ۴-ب).



شکل ۴ الف) شماتیک آزمون فشار تک‌محوری، ب) مفهوم بشک‌های شده و نواحی مرده در آزمون فشار

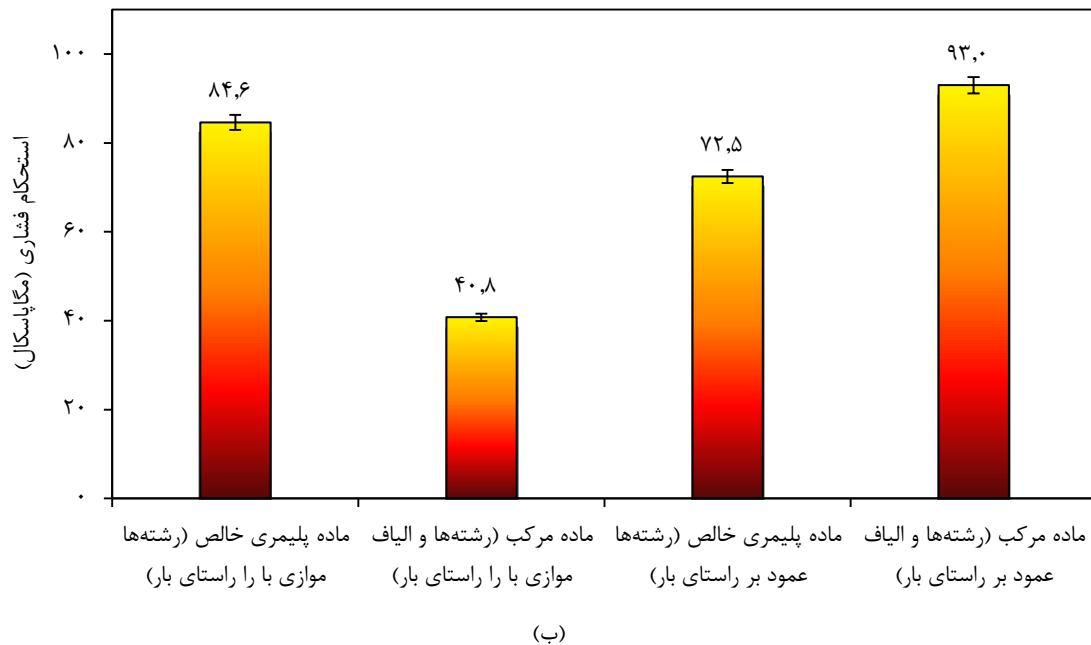
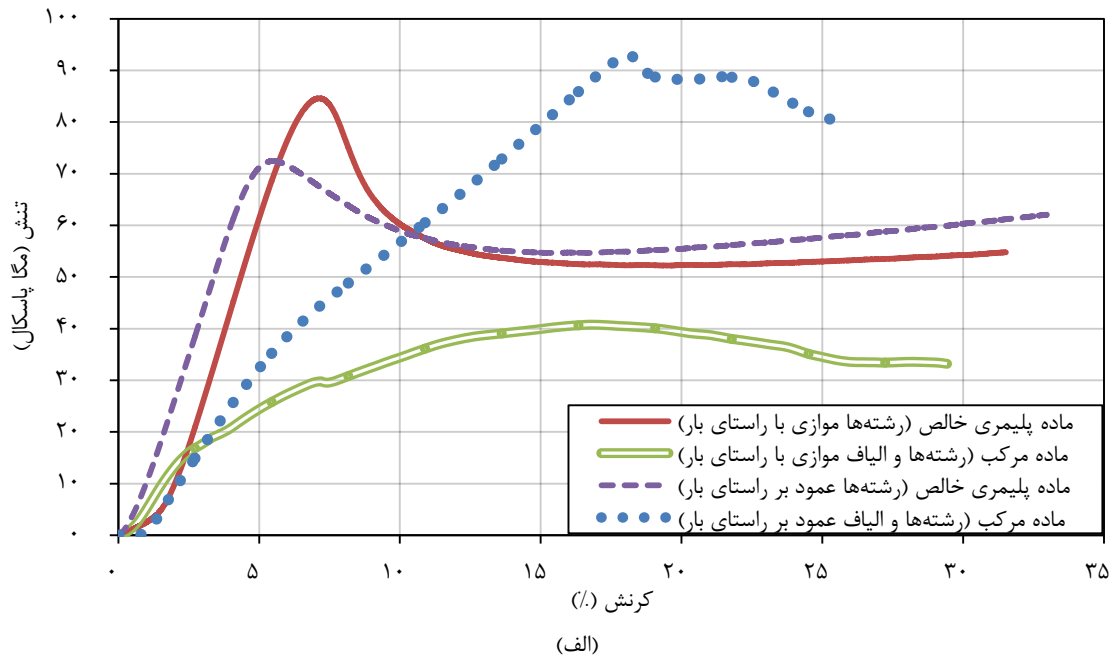
با توجه به دو الگوی پر شدن مختلف می توان انتظاراتی از نتایج حاصل از آزمون فشار داشت. زمانی که جهت ساخت XYZ باشد در ناحیه مرده الیاف پیوسته در کشش و ماتریس پلیمری تحت فشار است. در سایر نواحی در راستای محور Z الیاف و ماتریس تحت فشار هستند و در راستای X و Y پدیده کشش در ماتریس رخ خواهد داد. لذا انتظار می رود که پدیده کماتش در سایر نواحی به جز ناحیه مرده رخ داده و به دلیل کشش در راستاهای X و Y الیاف از ماتریس جدا شوند (شکل ۵-الف). زمانی که جهت ساخت ZXY است در راستای محور Z فشار حاکم بوده و در راستاهای X و Y کشش الیاف و ماتریس وجود دارد. لذا با توجه به الگوی پر شدن الیاف در صفحات XY تحت کشش بوده و انتظار این است که گسیختگی الیاف در قطر مربع یعنی جایی که جهت کشش از راستای X به راستای Y تغییر می کند رخ دهد. این امر در شکل ۵-ب نشان داده شده است.



شکل ۵ الف) تحلیل نمونه مرکب با جهت ساخت ZXY و ب) تحلیل نمونه مرکب با جهت ساخت XYZ

۳- نتایج و بحث

نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها در شکل ۶-الف و نتایج حاصل از آزمون فشار برای نمونه‌ها در شکل ۶-ب آمده است. همان گونه که مشاهده می شود در حالتی که رشته‌ها و الیاف در راستای اعمال بار است میزان استحکام ماده پلیمری از ماده مرکب بالاتر است. دلیل این امر این است که الیاف قابلیت تحمل بار فشاری ندارند و عملاً نقشی در تحمل بار ندارند. همچنین در مقایسه با دو جهت ساخت مختلف برای ماده پلیمری خالص مشاهده می شود زمانی که رشته‌ها در راستای اعمال بار قرار می گیرند میزان استحکام فشاری، مقدار بالاتری دارد. در مورد ماده مرکب زمانی که رشته‌ها و الیاف عمود بر راستای اعمال بار است، استحکام فشاری حداکثر است که در مقایسه با ماده پلیمری به میزان ۱۰ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر این است که در این الگو در هنگام اعمال فشار به دلیل وقوع پدیده کرنش عرضی الیاف تحت کشش قرار گرفته و در برابر تغییر شکل از خود مقاومت نشان می دهند. این مقاومت تا زمانی که کرنش اعمالی به کرنش شکست الیاف شیشه برسد، ادامه می یابد. با توجه به پایین بودن کرنش شکست الیاف در مقایسه با پلی لاکتیک اسید، شکست الیاف زودتر اتفاق افتاده است. حداکثر استحکام فشاری گزارش شده در پژوهش های پیشین برابر با ۷۲ مگاپاسکال است [۱۲]. در این پژوهش این مقدار برای نمونه‌ای که در آن رشته‌ها عمود بر جهت نیرو است حاصل شده است. از آنجایی که تحقیقی در مورد ارزیابی خواص فشاری ماده مرکب پلی لاکتیک اسید/الیاف پیوسته شیشه وجود ندارد مقایسه‌ای را نمی توان انجام داد.

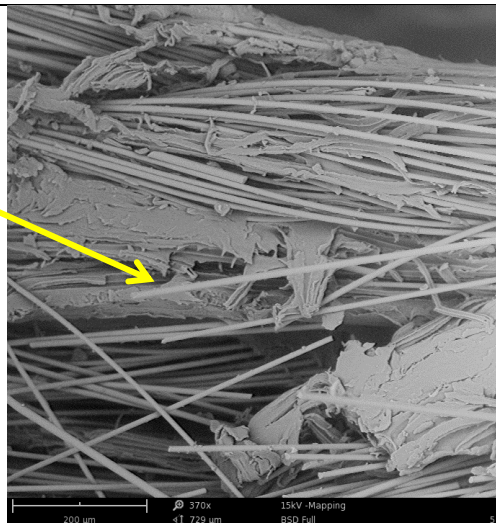


شکل ۶ الف) نمودار تنش - کرنش و ب) نتایج حاصل از آزمون فشار برای نمونه‌های پلیمری و مرکب

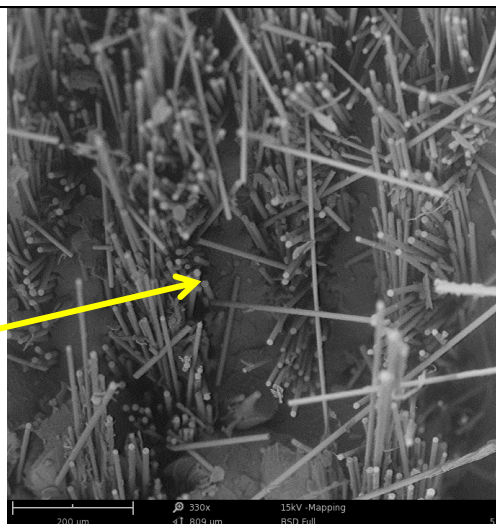
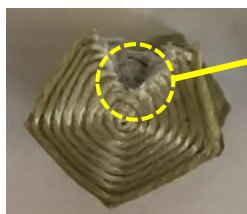
تصویر نمونه‌ها بعد از اتمام آزمون فشار نیز در شکل ۷ آمده است. در مورد نمونه‌های پلیمری حالت بشک‌های شدن در نمونه‌ها قابل مشاهده است. این امر در آزمون فشار به دلیل اصطکاک بین صفحات و نمونه ایجاد می‌شود. در نمونه مرکب زمانی که رشته‌ها و الیاف موازی با راستای است مشاهده می‌گردد که الیاف در نمونه دچار کماتش شده و الیاف از یکدیگر گسیخته شده‌اند. میکروگراف حاصل از مقطع گسیختگی نشان‌دهنده گسیختگی فاز ماتریس بوده و کماتش الیاف نیز تا حدودی قابل مشاهده است. در نمونه مرکب وقتی که الیاف در جهت عمود بر اعمال بار هستند مشاهده می‌شود که به دلیل وجود کرنش عرضی الیاف تحت کشش قرار گرفته و مد شکست الیاف تحت کشش مشاهده می‌شود. میکروگراف حاصل از مقطع گسیختگی نشان می‌دهد که پلیمر پس از تحمل کرنش و گسیخته شدن، برگشت داشته است ولی الیاف شیشه در همان طول باقی مانده‌اند. همچنین بیرون آمدگی الیاف^۱ به‌وضوح مشاهده می‌گردد.

¹ Fiber Pull-Out

الگوی هم مرکز (رشته ها موازی با راستای بار)	الگوی هم مرکز (رشته ها و الیاف موازی با راستای بار)
ماده پلیمری خالص	ماده مرکب



الگوی هم مرکز (رشته ها عمود بر راستای بار)	الگوی هم مرکز (رشته ها و الیاف عمود بر راستای بار)
ماده پلیمری خالص	ماده مرکب



شکل ۷ تصویر نمونه ها بعد از آزمون فشار

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش خواص فشاری پلی لاکتیک اسید و نیز ماده مرکب پلی لاکتیک اسید/الیاف پیوسته شیشه چاپ سه بعدی شده با فرایند ساخت افزایشی لایه نشانی ذوبی به روش آغشته سازی هم زمان با درصد حجمی الیاف ۳۰ درصد بررسی گردید. مهم ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- حداکثر استحکام فشاری پلی لاکتیک اسید به میزان ۸۴/۶ مگاپاسکال حاصل گردید که در این نمونه رشته ها در راستای نیروی فشاری بودند.
- استحکام فشاری ماده مرکب زمانی که الیاف پیوسته در راستای اعمال بار هستند برابر با ۴۰/۷۷ مگاپاسکال است. در این نمونه پدیده کماتش رخ داده است. دلیل کم بودن استحکام عدم توانایی تحمل بار توسط الیاف پیوسته تحت فشار است. همچنین میکروگراف حاصل از مقطع شکست نشان دهنده گسیختگی ماتریس است.

- استحکام فشاری ماده مرکب زمانی که الیاف پیوسته عمود بر راستای اعمال بار هستند برابر با ۹۳ مگاپاسکال است. دلیل بالا بودن استحکام فشاری این است که به دلیل ایجاد کرنش عرضی الیاف تحت کشش قرار گرفته و مد شکست پارگی الیاف است. همچنین میکروگراف حاصل از مقطع شکست این نمونه نشان‌دهنده بیرون‌زدگی الیاف تحت کشش است.

References

- [1] Mehrpouya M, Dehghanhadikolaei A, Fotovvati B, Vosooghnia A, Emamian SS, Gisario A. The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. *Applied Sciences*. 2019 Sep 14;9(18):3865. doi: 10.3390/app9183865
- [2] Singh D, Singh R, Boparai KS. Investigations for surface roughness and dimensional accuracy of biomedical implants prepared by combining fused deposition modelling, vapour smoothing and investment casting. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022 Jan 2;8(1):843-62. doi: 10.1080/2374068X.2020.1835007
- [3] Maleki H, Asadi P, Karimi Z, Sedghi A. Effect of weight percentage of alumina on mechanical properties of nanocomposite produced by additive manufacturing method of digital light processing. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jul 23;10(5):57-67. doi: 10.22034/ijme.2023.419202.1854 [In Persian]
- [4] Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):16-23. doi: 10.22034/ijme.2024.429126.1885 [In Persian]
- [5] Mirafzali SM, Hasanabadi A. Investigating the energy absorption quality of the porous Schwarz P structure made by 3D printing method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jan 21;9(11):13-20. doi: 10.22034/ijme.2023.383269.1744 [In Persian]
- [6] Akhoundi B, Behravesh AH. Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products. *Experimental Mechanics*. 2019 Jul 15;59:883-97. doi: 10.1007/s11340-018-00467-y
- [7] Akhoundi B, Hajami F. Extruded polymer instability study of the polylactic acid in fused filament fabrication process: printing speed effects on tensile strength. *Polymer Engineering & Science*. 2022 Dec;62(12):4145-55. doi: 10.1002/pen.26174
- [8] Kechagias J, Zaoutsos S. Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: Outlook and trends. *Materials and Manufacturing Processes*. 2024 Apr 25;39(6):804-14. doi: 10.1080/10426914.2024.2304843
- [9] Kechagias JD, Ninikas K, Vakouftsi F, Fountas NA, Palanisamy S, Vaxevanidis NM. Optimization of laser beam parameters during processing of ASA 3D-printed plates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Jan;130(1):527-39. doi: 10.1007/s00170-023-12711-4
- [10] Mohammadzadeh M, Gupta A, Fidan I. Mechanical benchmarking of additively manufactured continuous and short carbon fiber reinforced nylon. *Journal of Composite Materials*. 2021 Oct;55(25):3629-38. doi: 10.1177/00219983211020070
- [11] Araya-Calvo M, López-Gómez I, Chamberlain-Simon N, León-Salazar JL, Guillén-Girón T, Corrales-Cordero JS, Sánchez-Brenes O. Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*. 2018 Aug 1;22:157-64. doi: 10.1016/j.addma.2018.05.007
- [12] Aloyaydi B, Sivasankaran S, Mustafa A. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. *Polymer Testing*. 2020 Jul 1;87:106557. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106557
- [13] Bhandari S, Lopez-Anido RA, Gardner DJ. Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*. 2019 Dec 1;30:100922. doi: 10.1016/j.addma.2019.100922
- [14] Kotsilkova R, Petrova-Doycheva I, Menseidov D, Ivanov E, Paddubskaya A, Kuzhir P. Exploring thermal annealing and graphene-carbon nanotube additives to enhance crystallinity, thermal, electrical and tensile properties of aged poly (lactic) acid-based filament for 3D printing. *Composites Science and Technology*. 2019 Sep 8;181:107712. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107712
- [15] Basgul C, Yu T, MacDonald DW, Siskey R, Marcolongo M, Kurtz SM. Does annealing improve the interlayer adhesion and structural integrity of FFF 3D printed PEEK lumbar spinal cages?. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2020 Feb 1;102:103455. doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.103455
- [16] Pazhamannil RV, Krishnan C N, P G, Edacherian A. Investigations into the effect of thermal annealing on fused filament fabrication process. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022 Sep 30;8(sup2):710-23. doi: 10.1080/2374068X.2021.1946753
- [17] Akhoundi B, Behravesh AH, Bagheri Saed A. An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: in-melt

- simultaneous impregnation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2020 Jan;234(1-2):243-59. doi: [10.1177/0954405419843780](https://doi.org/10.1177/0954405419843780)
- [18] Akhouni B, Behraves AH, Bagheri Saed A. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2019 Feb;38(3):99-116. doi: [10.1177/0731684418807300](https://doi.org/10.1177/0731684418807300)
- [19] Craig Jr RR, Taleff EM. Mechanics of materials. John Wiley & Sons; 2020.