



مقایسه مقاومت خمشی قطعات مستطیل شکل ساخته شده بوسیله چاپ سه بعدی از جنس PLA با شیارهای مختلف

علی سلوکی¹، محمدرضا محمدعلیه^{2*}، احمد ماکوئی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع گرایش بهینه سازی سیستم‌ها، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

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

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، mrm_aliha@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

تولید قطعات با استفاده از چاپ سه بعدی که نوعی از تولید افزایشی می باشد، با سرعت بیشتری در حال گسترش است. این فناوری با رسوب لایه لایه ماده پلیمری ذوب شونده قادر به تولید هندسه های پیچیده است. پلی لاکتیک اسید (PLA) به دلیل خواص خوبی مانند زیست تخریب پذیر بودن و زیست سازگاری از جمله مواد پر کاربرد در این فناوری است که قطعات ساخته شده از آن در کاربردهای مختلف مهندسی در حال استفاده می باشد. استحکام این قطعات لایه لایه ای تابع پارامترهای چاپ مانند میزان چگالی پرشوندگی، جهت گیری چاپ، سرعت و دمای چاپ، فاصله الیاف و غیره می باشد. همچنین وجود شیار در قطعات مهندسی و به ویژه قطعات لایه لایه ای چاپ شده پلیمری می تواند تأثیر بسزایی در رفتار مکانیکی این مواد داشته باشد. در این تحقیق استحکام قطعات تیر کوتاه شیاردار با سه هندسه مختلف (U, V, keyhole) چاپ شده با ماده PLA تحت بارگذاری شبه استاتیکی خمشی به روش تجربی و آماری مورد بررسی قرار می گیرد. میزان بار و انرژی شکست نمونه ها محاسبه شده و همچنین حساسیت به هندسه شیار در قطعات آزموده شده ارزیابی می گردد. از آزمون فیشر برای مقایسه زوجی شیارها استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که شیار یک گوشه ای زاویه دار از همه ضعیف تر است در حالی که شیار دایره ای شکل مقاومت بیشتری دارد و این مقاومت با افزایش شعاع دایره افزایش می یابد.

دریافت: 1402/04/03

پذیرش: 1402/05/17

کلیدواژگان

چاپ سه بعدی،
مقاومت خمشی،
انرژی شیار،
مقایسه زوجی

Comparison of flexural strength in rectangular shape 3D-printed PLA samples with different grooves

Ali Solouki¹, Mohammad Reza Mohammad Aliha^{1*}, Ahmad Makui¹

1- School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, mrm_aliha@iust.ac.ir

Keywords

3D printing,
Flexural strength,
Influence of groove geometry,
Pairwise comparison

Abstract

The production of parts using 3D printing, which is a type of additive manufacturing, is expanding at a faster rate. This technology can produce complex geometries by depositing melting polymer material layer by layer. Polylactic acid (PLA) is one of the most widely used materials in this technology due to its good properties such as biodegradability and bio-compatibility, and parts manufactured with PLA are being used in various engineering applications. The strength of these layer-by-layer parts depends on the printing parameters such as the infill density, the orientation of the printed fibers, the speed and temperature of the print, the distance between the fibers, etc. Also, the presence of grooves in engineering parts, especially printed polymer layer-by-layer parts, can significantly affect the mechanical behavior of these materials. In this research, the strength of short grooved beam parts with three different geometries (U, V, key hole) printed with PLA material under quasi-static bending loading is investigated experimentally and statistically. The amount of load and fracture energy of the samples are measured and also the sensitivity to the geometry of the groove in the tested parts is evaluated. Fisher's test is used for pairwise comparison of the grooves' strength. The results of this research show that the groove with an angled corner is the weakest, while the circular groove has a higher resistance, and this resistance increases when the radius of the circle is increased.

1- مقدمه

امروزه مهم ترین مقوله های اساسی تولید محصولات در صنایع عبارتند از تولید تکوینی^۱، تولید کاهشی^۲ و تولید افزایشی^۳. در میان همه این ها تولید افزایشی جدیدترین فناوری بشمار می آید. این فناوری از رسوب لایه به لایه مواد برای ساخت قطعاتی با کمک فناوری طراحی به کمک رایانه^۴ استفاده می کند. ابتدا یک مدل مجازی از محصول توسط کامپیوتر تولید شده و سپس مدل به مقاطع دوبعدی تقسیم می شود. برای تولید محصول، داده های دوبعدی باید به ماشین تولید افزایشی منتقل شوند. دستگاه تولید افزایشی سطوح مقطع دوبعدی را لایه به لایه رسوب می دهد و این کار ادامه می یابد تا محصول به طور کامل چاپ شود [1].

امروزه چاپ سه بعدی^۵ در بخش های مختلفی مانند خودروسازی، مراقبت های بهداشتی و کاربردهای زیست پزشکی، حمل و نقل، هوافضا و دفاع، نیرو و انرژی کاربرد دارد [2-3]. چاپ سه بعدی شامل فناوری های مختلفی مانند مدل سازی رسوب ذوب شده^۶، نفجوشی لیزری انتخابی^۷، استریولیتوگرافی^۸ و سایر فناوری ها می باشد. یک بررسی جهانی نشان می دهد که مدل سازی رسوب ذوب شده رایج ترین تکنیک است [2].

مدل سازی رسوب ذوب شده به عنوان بخشی از اکستروژن مواد، سریع ترین پیشرفت را در بین تمام روش های تولید افزایشی داشته و در طول سال های اخیر مورد توجه مصرف کنندگان قرار گرفته است. در این فرآیند، یک نازل با حرکت در یک پلان^۹ دوبعدی یک فیلامنت ذوب شده را بر روی یک پلتفرم^{۱۰} تزریق می کند و در نتیجه یک لایه از یک مقطع را ایجاد می کند. پلتفرم قادر است برای هر لایه به بالا یا پایین حرکت کند و این روند تا زمانی که کل قطعه چاپ شود ادامه می یابد. به دلیل سادگی، هزینه کم و توانایی تولید هندسه های مختلف، این فناوری با کاربردهای متعدد توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [1]. قابلیت چاپ هندسه های پیچیده و عملکردی انعطاف پذیر، منجر به کاهش هزینه های مونتاژ می شود که خود یکی از علل کاربرد روزافزون این فناوری است. با این حال، استفاده از این فناوری در تولید قطعات مختلف دارای معایبی است که از جمله آن ها می توان به سطح نامنظم، خواص مکانیکی ضعیف و دقت پایین ابعادی اشاره کرد.

اگرچه در برخی موارد مانند نمونه های اولیه سریع^{۱۱}، مقاومت مکانیکی زیادی لازم نیست، برای اینکه این فناوری در صنعت قابل قبول تر باشد و برای اینکه تولید انبوه قطعات چاپی توجیه پذیر شود، مقاومت مکانیکی می تواند یک نیاز اصلی بشمار آید. برای تولید کنندگان مهم است که قطعاتی با کیفیت پایدار بسازند تا بتوانند انتظارات مصرف کنندگان را برآورده سازند. انتخاب بهترین پلیمر گرماترم^{۱۲} با توجه به کاربرد پیشنهادی قطعه یک امر ضروری است که باید پیش از شروع فرآیند تولید انجام شود. محققان در تلاش اند تا مواد جدید قابل استفاده در رسوب سازی مدل ذوب شده را بیابند و همچنین بر روی بهبود ویژگی های مواد شناخته شده کار کنند [4].

موادی که می توان در این فرآیند استفاده کرد باید دارای خواص حرارتی و رئولوژیکی^{۱۳} مناسب باشد. دو نمونه مناسب از این مواد عبارتند از اکریلونیتریل-بوتادین استایرن^{۱۴} و اسید پلی لاکتیک^{۱۵}. نقطه ذوب مناسب، دمای انتقال شیشه ای، شاخص جریان ذوب و غیره ویژگی هایی هستند که تنها تعداد کمی از مواد دارا می باشند و این خواص به پردازش آسان آن ها در چاپگر کمک می کند. پلی کربنات^{۱۶} و پلی آمید^{۱۷} نیز در رسوب سازی مدل ذوب شده مورد استفاده قرار می گیرند، اما استفاده ی کمتری دارند [5]. پلی لاکتیک اسید به دلیل ویژگی های خاص خود مانند نقطه ذوب پایین، غیرسمی بودن، غیر تحریک پذیری و همچنین تجزیه پذیری به طور گسترده در فناوری رسوب سازی مدل ذوب شده استفاده می شود. به دلیل این ویژگی ها، کاربرد آن در چاپ سه بعدی به یک کانون تحقیقاتی تبدیل شده و هر ساله مقالات زیادی در مورد آن منتشر می شود [6-7].

حیدری رارانی و همکاران تأثیر سه پارامتر فرآیند چگالی چاپ، سرعت چاپ و ضخامت لایه را بر مقاومت کششی نمونه های ساخته شده از پلی لاکتیک-اسید بررسی کردند. آن ها دریافتند که بیشترین مقاومت در چگالی چاپ 80 درصد رخ می دهد [8]. تریونو و همکاران^{۱۸} [9] تأثیر عامل پهنای نازل را بر مقاومت کششی قطعه ی تولیدی بررسی کردند. نتیجه این بود که با افزایش پهنای نازل چگالی افزایش یافته و استحکام کششی نیز در ماده ی پلی لاکتیک اسید افزایش می یابد. فانگ و همکاران^{۱۹} [10] میزان اثرگذاری دما و رطوبت را بر خواص مکانیکی و شکل هندسی قطعات تولید شده با ماده ی اولیه ی پلی-کربنات بررسی کرده اند. در این آزمایش مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هوبن و همکاران^{۲۰} [11] با استفاده از نرم افزار مینی تب در ابتدا از روش تاگوچی اثرگذاری سه پارامتر دمای نازل، سرعت چاپ و قطر لایه را بر مقاومت کششی قطعات چاپ شده با پلی لاکتیک اسید بررسی کردند، سپس با استفاده از رگرسیون رفتار آن را در نقاط دیگر پیش بینی کردند. عبدالرحمان و همکاران^{۲۱} [12] علاوه بر مقاومت کششی به دنبال بهینه کردن دقت ابعاد، کیفیت سطح و هزینه ی تولید قطعه با ماده ی پلی لاکتیک اسید بودند. جهت گیری ساخت در این آزمایش به طور گسترده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

چاکون و همکاران^{۲۲} [13] عوامل جهت گیری ساخت، ضخامت لایه و سرعت چاپ را بر اساس آزمون های کشش و خمش سه نقطه ای بررسی کردند. قطاوی و همکاران^{۲۳} [14] علاوه بر بررسی عوامل مؤثر بر استحکام کششی ماده ی پلی لاکتیک اسید دقت ابعاد و زمان ساخت را نیز مورد ارزیابی قرار دادند. لیو و همکاران^{۲۴} [15] با در نظر گرفتن سه ویژگی مقاومت کششی، استحکام خمشی و مقاومت در برابر ضربه پنج عامل را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از تحلیل واریانس و ترکیب این سه ویژگی حالت بهینه ای را ارائه دادند. فرناندس و همکاران^{۲۵} [16] چهار پارامتر چگالی، دمای نازل، ضخامت لایه و زاویه ی لایه چینی را در چند خاصیت مکانیکی از جمله استحکام کششی و

¹⁵ Polylactic acid

¹⁶ Polycarbonate

¹⁷ Polyamide

¹⁸ Triyono et al

¹⁹ Fang et al

²⁰ Huynh et al

²¹ Abdelrhman et al

²² Chacón et al

²³ Qattawi et al

²⁴ Liu et al

²⁵ Fernandes et al

¹ Formative manufacturing

² Subtractive manufacturing

³ Additive manufacturing

⁴ Computer aided design

⁵ Three-dimensional printing

⁶ Fused deposition modeling

⁷ Selective laser sintering

⁸ Stereolithography

⁹ Plan

¹⁰ Platform

¹¹ Rapid prototyping

¹² Thermoplastic

¹³ Rheological

¹⁴ Acrylonitrile Butadiene Styrene

جدول 1 پارامترهای فرآیند چاپ سه بعدی

Table 1 Process parameters of 3D-printing

پارامتر فرآیند	مقدار
ضخامت لایه	0.25 میلی متر
درصد پرکردن	70%
سرعت چاپ	45 میلی متر بر ثانیه
زاویه ی لایه چینی	45\+45
الگوی چاپ	مستطیلی
دمای نازل	200 درجه ی سانتی گراد
تعداد لایه های بالایی و پایینی	2

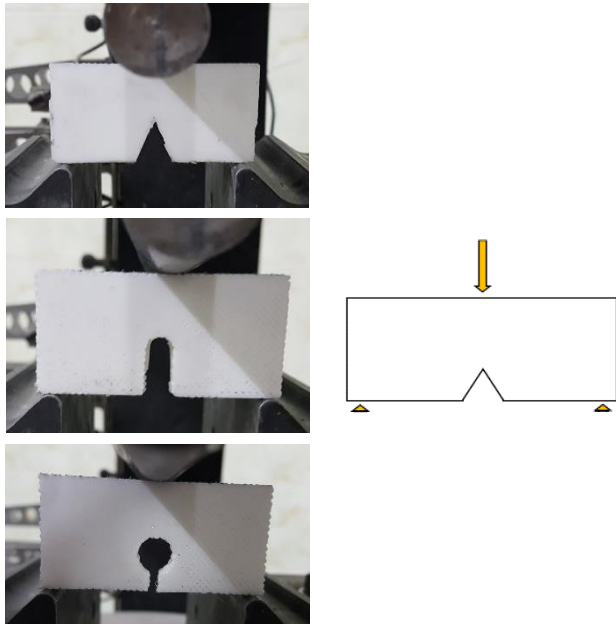


Fig. 1 Geometry and loading configuration applied to the 3D-printed PLA samples.

شکل 1 هندسه و بارگذاری خمشی اعمالی به نمونه های چاپ شده از جنس PLA

نکته ی قابل توجه در همه ی این هندسه ها وجود تقارن بین قسمت راست و چپ آن ها است. به جز شیار، بقیه ی ابعاد هندسی میان نمونه های آزمایش یکسان است. تمام نمونه ها مکعب مستطیل هایی با طول 60 میلی متر، عرض 30 میلی متر و ارتفاع 6 میلی متر هستند. در این تحقیق تلاش شده است که مساحت سه شیار با یکدیگر برابر باشد. علاوه بر این ارتفاع شیارها همگی یکسان و برابر 15 میلی متر است. لذا می توان انتظار داشت که ماده ی اولیه مصرفی برای تولید هر سه شیار یکسان باشد. البته جلوتر صحت این حدس بررسی می شود. در این ادامه به توضیح ابعاد و شکل هندسی شیارها پرداخته می شود.

2-1- شیار V شکل

این شیار در حقیقت یک مثلث متساوی الساقین با ارتفاع 15 میلی متر و زاویه ی بین دو ساق 45 درجه است. در شکل 2 جزئیات ابعاد این شیار نشان داده شده است.

استحکام تسلیم مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از ماده ی پلی لاکتیک-اسید استفاده شده است. برخی از محققان به بررسی مقاومت ترک خوردگی، چقرمگی شکست و یا انرژی شکست قطعات چاپ شده با فیلامنت های پلیمری پرداخته اند [17-21]. برخی دیگر نیز تأثیر پارامترهای چاپ در قطعات ساخته شده بوسیله این روش را در تحقیقات خود مورد بررسی قرار داده اند [22-24]. انصاری پور و همکاران قابلیت ها، ویژگی ها و کاربردهای چاپ چهاربعدی را مرور کردند [25].

سان و همکاران¹ [26] با هدف ارزیابی شرایط روند تولید بر کیفیت رابطه ی بین دو رشته ی مجاور در مدل رسوب ذوب شده، سه عامل از جمله دما را مورد بررسی قرار دادند. ماده ی اولیه ی مورد ارزیابی اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن است و مقاومت خمشی به عنوان خاصیت مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. سود و همکاران² [27] از تحلیل واریانس برای بدست آوردن متغیرهای مؤثر بر محصولات بدست آمده از روش رسوب سازی مدل ذوب شده که خود زیرمجموعه ای از فناوری های نمونه سازی سریع است استفاده کرده و برای کاهش تعداد آزمایش ها، طراحی مرکب مرکزی را به کار برده اند و در نهایت نقاط بهینه را تعیین کردند. در این آزمایش نیز ماده ی اولیه ی مورد استفاده اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن است و مقاومت خمشی به عنوان خاصیت مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در یک نگاه کلی به مقالات مرور شده می توان گفت که بیشترین این مقالات به دنبال بهبود خواص مکانیکی محصولات تولید شده از روش رسوب سازی مدل ذوب شده هستند اما به طور غالب تنها مقاومت کششی ارزیابی شده و جای کار برای سایر خواص مکانیکی مانند مقاومت خمشی وجود دارد. از طرف دیگر تعدادی از مقالاتی که مقاومت خمشی را بررسی کرده اند از ماده ی اولیه ی اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن استفاده کرده اند و ماده ی پلی-لاکتیک اسید، با توجه به دارابودن خواصی مانند سازگاری با بدن انسان، باید بیشتر مورد ارزیابی قرار بگیرد. تمامی این مقالات سعی بر شناسایی پارامترهای مؤثر در طول فرآیند چاپ سه بعدی و همچنین تعیین سطوح مناسب برای این پارامترها را دارند. به جای بررسی پارامترهای فرآیند می توان به تحلیل هندسه های مقاوم در برابر بارگذاری توجه کرد و سعی بر این باشد که مقاوم ترین هندسه برای تولید یک قطعه شناسایی شود، به خصوص در مورد شیارهایی که ناگزیر در بعضی موارد باید در قطعات وجود داشته باشند. برای اینکه دو قطعه در کنار یکدیگر قرار بگیرد و به راحتی از هم جدا نشود، یک راه حل مناسب و پرکاربرد در طراحی قطعات استفاده از شیارهایی مابین آن هاست. هندسه ی شیار می تواند نقش تعیین کننده ای در مقاومت مکانیکی قطعات داشته باشد، لذا شناسایی شیارهای مقاوم ضرورت زیادی دارد.

2- طرح ها و آزمایش ها

در این تحقیق سه هندسه ی شیار مورد ارزیابی قرار می گیرد و سعی بر آن است تا مقاوم ترین شیار شناسایی شود. ماده ی اولیه ی مورد استفاده پلی لاکتیک اسید است و نمونه ها با روش مدل سازی رسوب ذوب شده تولید می شوند. خاصیت مکانیکی مورد بررسی در این تحقیق مقاومت خمشی سه نقطه است. مقاومت خمشی هر کدام از این شیارها با سه تکرار سنجیده می شود. پارامترهای فرآیند در سرتاسر این تحقیق یکسان است که جزئیات بیشتر آن در جدول 1 آورده شده است. در شکل 1 نحوه ی بارگذاری به نمونه ها توسط دستگاه برای هر سه شیار نشان داده شده است.

² Sood et al

¹ Sun et al

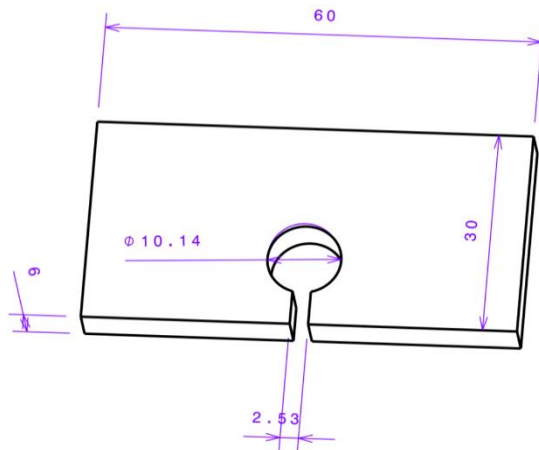


Fig. 4 Geometry and dimensions of Keyhole-grooved sample

شکل 4 ابعاد و هندسه شیار کلیدی شکل

در جدول 2 داده‌های متناظر مربوط به وزن، بار شکست و انرژی خمشی نمونه‌ها آورده شده است. به طور کلی با یک نگاه به داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که وزن برای هر سه شیار با تقریب بسیار خوبی یکسان است اما مقاومت خمشی قطعات با تغییر شیار تغییر می‌کند. در ادامه به بررسی این تحلیل‌ها به صورت عددی و با استفاده از تحلیل واریانس پرداخته می‌شود. این آزمون فرض برابر بودن مقاومت خمشی همه‌ی انواع شیارها را با اینکه حداقل دو شیار با هم مقاومت متفاوتی داشته باشند بررسی می‌کند، البته لازم به ذکر است که این آزمون دارای فرض اولیه‌ی پیروی از توزیع نرمال و برابری واریانس‌ها است که صحت این فرض‌ها نیز بررسی شده است. سپس با کمک آزمون فیشر استحکام تمام شیارها دوبه‌دو با هم مقایسه خواهند شد تا شیار با مقاومت بیشتر شناسایی شود.

جدول 2 داده‌های آزمون خمش سه نقطه‌ای انجام شده بر روی قطعات چاپ سه بعدی و با هندسه‌های شیار مختلف

Table 2 Experimental results obtained for fracture load and flexural fracture energy of tested 3D-printed samples with different U, V and K grooves.

انرژی خمشی (ژول)	بار شکست (نیوتون)	وزن (گرم)	تکرار	نوع شیار
2.216	736.25	6.9	1	شکل V
2.840	717.34	6.9	2	شکل V
2.980	867.47	7.0	3	شکل V
5.820	793.75	7.0	1	شکل U
5.060	913.28	6.9	2	شکل U
4.470	763.16	7.0	3	شکل U
10.870	1201.54	6.9	1	کلیدی
9.550	1152.87	7.0	2	کلیدی
9.950	1190.52	7.0	3	کلیدی

1-3- آنالیز واریانس

ابتدا باید مجموع مربعات حساب شود تا بتوان بر اساس آن یکسان بودن یا نبودن تأثیر عامل نوع شیار را بررسی کرد. سه نوع مجموع مربعات باید محاسبه

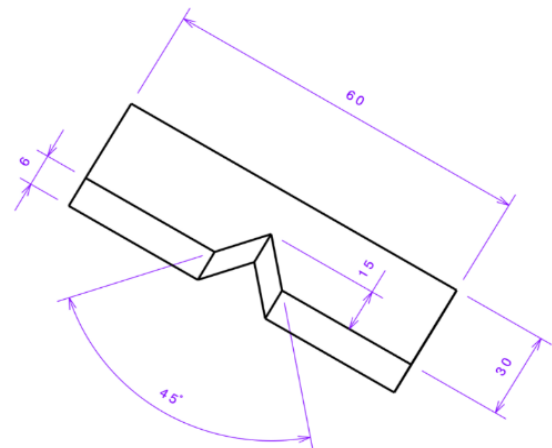


Fig. 2 Geometry and dimensions of V-grooved sample.

شکل 2 هندسه و ابعاد قطعه آزمایشگاهی با شیار V شکل

2-2- شیار U شکل

هندسه‌ی این شیار تشکیل شده از یک نیم‌دایره مماس شده به یک مستطیل است. قطر نیم‌دایره برابر با عرض مستطیل است و مجموع طول مستطیل با شعاع دایره برابر با ارتفاع شیار (15 میلی‌متر) می‌باشد. در شکل 3 جزئیات ابعاد این شیار نشان داده شده است.

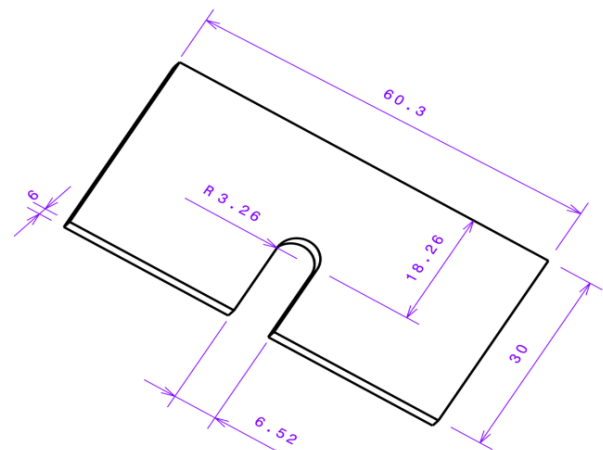


Fig. 3 Geometry and dimensions of U-grooved sample

شکل 3 هندسه و ابعاد قطعه آزمایشگاهی با شیار U شکل

3-2- شیار کلیدی شکل

این شیار درحقیقت ترکیب یک دایره و یک مستطیل است البته این دو مقدار اندکی با هم هم‌پوشانی دارند که در هنگام محاسبه‌ی مساحت، این هم‌پوشانی از مجموع مساحت دایره و مستطیل کم می‌شود. شعاع دایره دو برابر عرض مستطیل است. در شکل 4 جزئیات ابعاد این شیار نشان داده شده است.

3- بحث روی نتایج و تحلیل داده‌ها

وزن هر کدام از نمونه‌های آزمایشی بیان‌گر مقدار ماده‌ی اولیه‌ی مصرف شده در فرآیند آزمایش است. برابری وزن‌ها نشان‌دهنده درستی محاسبات انجام شده در بدست آوردن ابعاد و مساحت‌ها است. در شکل 5 قطعات چاپ شده قبل از آزمون خمش سه نقطه قابل مشاهده است.

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_{Error}}$$

اگر $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ باشد، فرض صفر را رد کرده و نتیجه گرفته می شود که فاکتور بر نتایج آزمایش مؤثر است. در اینجا خطای نوع اول برابر پنج صدم در نظر گرفته شده است $(0.05=\alpha)$ ، به این ترتیب $F_{0.05, 2, 6} = 5.16$. جزئیات محاسبات در جدول 3 قابل مشاهده است. از آنجا که $5.16 < 32.71$ لذا فرض صفر رد می شود و این نتیجه گرفته می شود که عامل هندسه ی شیار بر بار شکست نمونه ها مؤثر است.

جدول 3 جزئیات آنالیز واریانس

Table 3 Details of analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
type	2	297240	148620	32.71	0.001
Error	6	27261	4543		
Total	8	324501			

حال باید صحت مدل بررسی شود. P-value برای برابری واریانس ها برابر 0.306 و همچنین P-value برای پیروی از توزیع نرمال برابر 0.117 است که هر دو آن ها بزرگ تر از 0.05 می باشند، به این ترتیب می توان فرض کرد که داده ها از توزیع نرمال پیروی می کنند و دارای واریانس یکسان هستند، که این امر صحت فرضیات مدل را نشان می دهد. علاوه بر این نمودار باقیمانده های این مدل هیچ روند خاصی را نشان نمی دهد همان طور که در شکل 6 هم قابل مشاهده است. تمام این موارد قابلیت اطمینان به نتایج آنالیز واریانس را نشان می دهد. در شکل 7 یک نمونه از هر شیار بعد از آزمون نشان داده شده است.

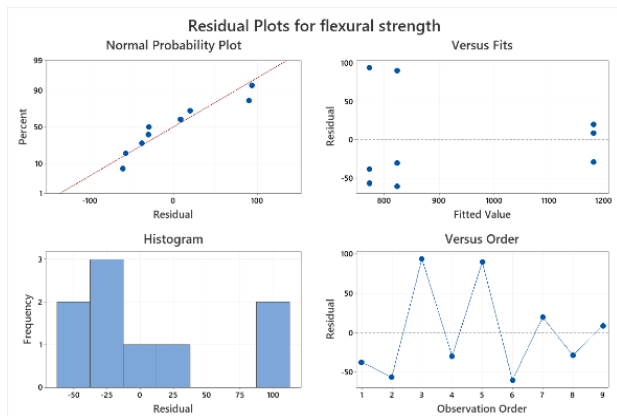


Fig. 6 Investigation of residuals

شکل 6 بررسی باقیمانده ها

همان طور که قابل مشاهده است ترک ها از وسط شیارها به صورت زیگزاگی رشد کرده اند که این امر به خاطر لایه چینی شطرنجی با زوایای عمود برهم است. قبل تر گفته شد که با اندازه گیری وزن نمونه ها، درستی محاسبات انجام شده مربوط به مساحتها بررسی می شود. F-value آزمون برابری وزن ها برابر 0.33 است که به طور واضح کمتر از 5.16 می باشد، پس فرض برابری وزن ها رد نمی شود. لذا می توان وزن ها را برابر فرض کرد در نتیجه ماده اولیه ی مصرف شده در تولید سه شیار یکسان است. اگرچه تأثیرگذاری عامل شیار مشخص شد اما باید بین انواع مختلف شیارها مقایسه شود و شیار با مقاومت بیشتر شناسایی شود.

شود که شامل SS_{Total} (مجموع مربعات کلی)، $SS_{Treatment}$ (مجموع مربعات عوامل) و SS_{Error} (مجموع مربعات خطا) می باشد [28].

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (1)$$

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_{Error} = SS_{Total} - SS_{Treatment} \quad (2)$$



Fig. 5 View of grooved samples made by 3D-printing method.

شکل 5 نمایی از تمامی نمونه های شیاردار ساخته شده بوسیله چاپ سه بعدی

در معادلات 1 و 2، a نمایانگر حالت های مورد بررسی فاکتور آزمایشی است، n نشان دهنده ی تعداد تکرارها در هر حالت فاکتور و N میانگین تعداد کل نمونه های آزمایشی $(a \times n)$ می باشد. y_{ij} تکرار j ام از حالت i ام فاکتور است. y_i هم میانگین تکرارهای حالت i ام فاکتور موردنظر و $y_{..}$ میانگین همه ی نمونه های آزمایشی است.

در معادله ی 3، μ میانگین کلی نمونه ها، τ_i میانگین i امین حالت فاکتور و ϵ_{ij} نشان دهنده خطا است. فرض می شود که این خطا از یک توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 پیروی می کند.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad (3)$$

برای بررسی تأثیرگذاری فاکتور باید برابری میانگین حالت ها (τ_i) بررسی شود. اگر این میانگین ها برابر باشند، آنگاه می توان نتیجه گرفت که این فاکتور بر نتایج آزمایش تأثیری ندارد. لذا فرض صفر برابری همه ی میانگین حالت ها (τ_i) با صفر است و فرض یک عدم برابری حداقل یکی از آن ها با صفر می باشد.

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \quad i \text{ حداقل برای یک}$$

برای بررسی برابری میانگین حالت ها باید میانگین مربعات را که به صورت MS نشان داده شده است حساب شود.

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a - 1}$$

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{N - 1}$$

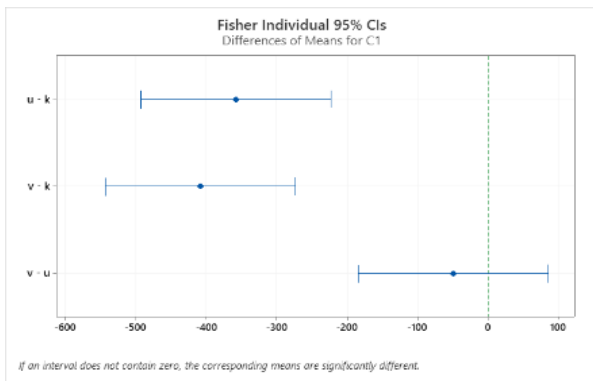


Fig. 8 Fisher's test for comparison of flexural fracture loads in the investigated 3D-printed PLA parts with different U, V and K grooves. شکل 8 آزمون فیشر برای مقایسه بار شکست خمشی در نمونه‌های آزموده شده از جنس PLA و با شیارهای مختلف U, V, K

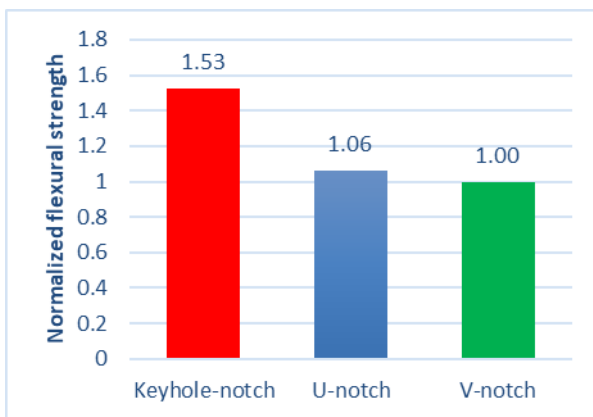


Fig. 9 Comparison of normalized fracture loads in different grooved samples. شکل 9 مقایسه‌ی میانگین بار شکست بدون شده در شیارهای مختلف

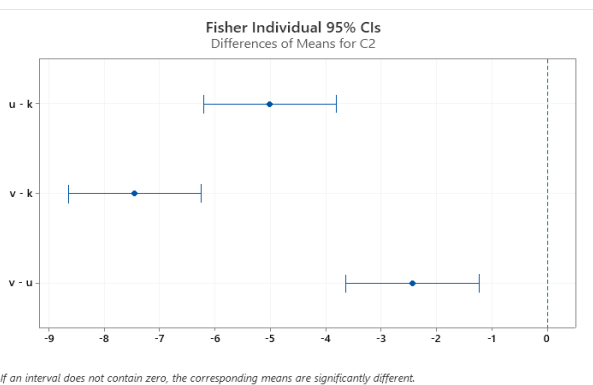


Fig. 10 Comparison of Fisher's test for fracture energy of 3D-printed parts with different U, V and K grooves. شکل 10 مقایسه آزمون فیشر انرژی شکست خمشی در نمونه‌های آزموده شده از جنس PLA و با شیارهای مختلف U, V, K

در شکل های 9 و 11 داده‌های بار شکست و انرژی خمشی نرمال شده‌اند به این ترتیب که هر کدام به ترتیب بر میانگین بار شکست و انرژی خمشی شیار V شکل تقسیم شده‌اند، بدیهی است که این نسبت برای خود شیار V شکل برابر 1 است. مطابق شکل‌های 9 و 11 شیار U دارای بار شکست و انرژی شکستی به ترتیب 6 درصد و 91 درصد بیشتر از شیار V شکل است. ناچ

2-3- روش فیشر برای مقایسات زوجی

در معادله 4 نحوه‌ی محاسبه‌ی LSD بیان شده است. برای هر زوج i و j اگر $|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > LSD$ باشد، آنگاه می‌توان نتیجه گرفت که سطوح i و j فاکتور به طور معناداری باهم تفاوت دارند [19]. در اینجا:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, N-a} \sqrt{\frac{2MS_{Error}}{n}} \quad (4)$$

$$LSD = 2.447 \times 55.033 = 134.66$$

$$|\bar{y}_v - \bar{y}_u| = 49.7 < 134.66$$

$$|\bar{y}_v - \bar{y}_k| = 334.9 > 134.66$$

$$|\bar{y}_k - \bar{y}_u| = 295.2 > 134.66$$

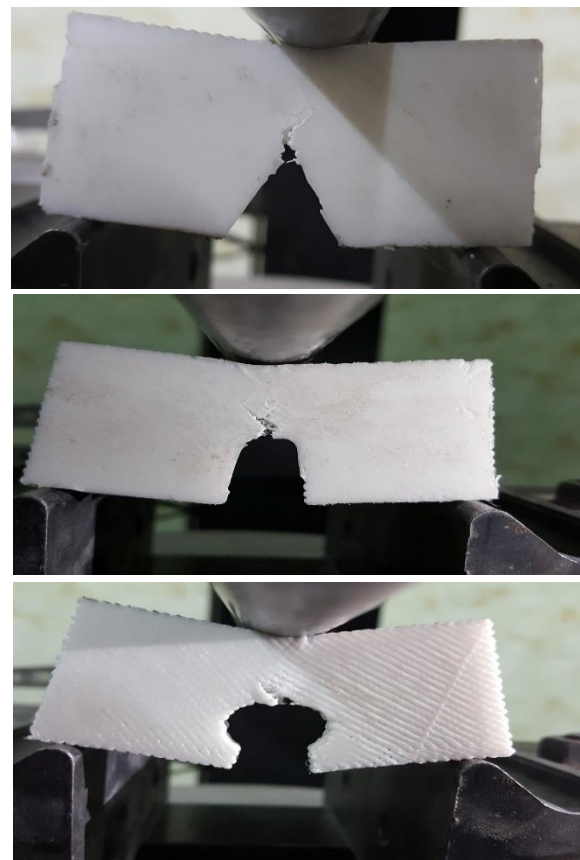


Fig. 7 Deformation and failure patterns observed in the tested samples subjected to three-point bend loading.

شکل 7 نحوه تغییر شکل و واماندگی نمونه‌ها پس از اعمال بار خمشی سه نقطه‌ای

طبق نتایج بدست آمده بار شکست شیار V شکل و شیار U شکل تقریباً یکسان است اما این دو شیار با شیار کلیدی شکل متفاوت هستند. این امر به خوبی در شکل 8 قابل مشاهده است. در شکل 9 نسبت میانگین بار شکست شیارها به میانگین بار شکست شیار V شکل با هم مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل 10 و شکل 11 قابل مشاهده است، داده‌های انرژی خمشی نتایجی مشابه مقاومت خمشی را نشان می‌دهد با این تفاوت که در اینجا شیار V شکل و شیار U شکل باهم متفاوت شناخته می‌شوند.

5- مراجع

- [1] Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A. and Talamona, D., "Optimisation of Strength Properties of Fdm Printed Parts—a Critical Review" *Polymers*, Vol. 13, No. 10, pp. 1587, 2021.
- [2] Gordelier, T. J., Thies, P. R., Turner, L. and Johanning, L., "Optimising the Fdm Additive Manufacturing Process to Achieve Maximum Tensile Strength: A State-of-the-Art Review" *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25, No. 6, pp. 953-971, 2019.
- [3] Gharehbaghi, H. and Farrokhhabadi, A., "Experimental and Numerical Investigation of the Energy Absorption Capability of the Bi-Material Lattice Structure" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 2, pp. 1976-1982, 2022.
- [4] Dey, A. and Yodo, N., "A Systematic Survey of Fdm Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics" *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 3, No. 3, pp. 64, 2019.
- [5] Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S. and Jayanth, N., "A Review on Composite Materials and Process Parameters Optimisation for the Fused Deposition Modelling Process" *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 12, No. 1, pp. 47-59, 2017.
- [6] Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y. and Yan, C., "A Critical Review of Fused Deposition Modeling 3d Printing Technology in Manufacturing Polylactic Acid Parts" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, pp. 2877-2889, 2019.
- [7] Kashfi, M., Pourrabia, P. and Kahhal, P., "A Correction Factor to Improve Poisson's Ratio Prediction of 2d Auxetic Structure Using Finite Element Analysis and Experiment" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 2, pp. 1556-1562, 2021.
- [8] Heidari-Rarani, M., Sadeghi, P. and Ezati, N., "Effect of Processing Parameters on Tensile Properties of Fdm 3d Printed of Pla Specimens" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 855-862, 2020.
- [9] Triyono, J., Sukanto, H., Saputra, R. M. and Smaradhana, D. F., "The Effect of Nozzle Hole Diameter of 3d Printing on Porosity and Tensile Strength Parts Using Polylactic Acid Material" *Open Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 762-768, 2020.
- [10] Fang, L., Yan, Y., Agarwal, O., Yao, S., Seppala, J. E. and Kang, S. H., "Effects of Environmental Temperature and Humidity on the Geometry and Strength of Polycarbonate Specimens Prepared by Fused Filament Fabrication" *Materials*, Vol. 13, No. 19, pp. 4414, 2020.
- [11] Huynh, L. P., Nguyen, H. A., Nguyen, H. Q., Phan, L. K. and Thanh, T. T., "Effect of Process Parameters on Mechanical Strength of Ffabricated Parts Using the Fused Deposition Modelling Method", 2019.
- [12] Abdelrhman, A. M., Gan, W. W. and Kurniawan, D., "Effect of Part Orientation on Dimensional Accuracy, Part Strength, and Surface Quality of Three Dimensional Printed Part" in *Proceeding of IOP Publishing*, pp. 012048.
- [13] Chacón, J., Caminero, M. A., García-Plaza, E. and Núñez, P. J., "Additive Manufacturing of Pla Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection" *Materials & Design*, Vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [14] Qattawi, A., Alrawi, B. and Guzman, A., "Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach" *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, pp. 791-803, 2017.
- [15] Liu, X., Zhang, M., Li, S., Si, L., Peng, J. and Hu, Y., "Mechanical Property Parametric Appraisal of Fused Deposition Modeling Parts Based on the Gray Taguchi Method" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 2387-2397, 2017.

کلیدی شکل هم دارای بار شکست و انرژی شکستی به ترتیب 53 درصد و 2.78 درصد بیشتر از شیپ V شکل است. سطح مقطع شیپهای U شکل و کلیدی شکل یک دایره است در حالی که سطح مقطع شیپ V شکل یک گوشه‌ی زاویه دار است. شعاع دایره‌ی مقطع در شیپ کلیدی شکل بزرگ تر است. می توان گفت که سطح مقطع گوشه‌ی زاویه دار ضعیف تر از سطح مقطع دایره‌ی شکل است و با افزایش شعاع دایره استحکام این سطح مقطع افزایش می یابد. البته لازم به ذکر است که این نتایج امکان دارد با تغییر ماده‌ی اولیه و یا روش تولید تغییر کند که جای کار بیشتر در مقالات آینده وجود دارد.

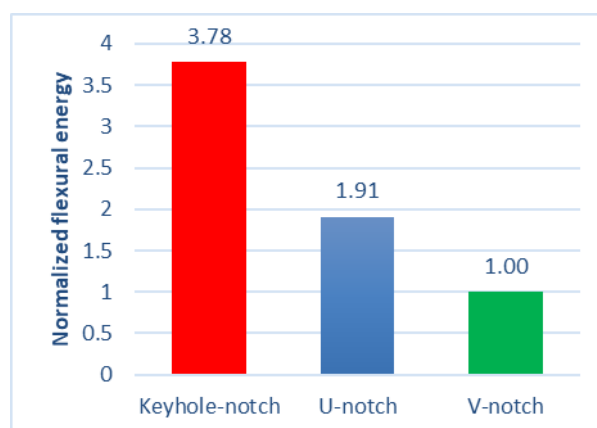


Fig. 11 Comparison of normalized flexural fracture energy in the tested U, V and K grooves

شکل 11 مقایسه‌ی میانگین انرژی خمشی بدون شده در سه شیپ مختلف U, V, K

4- نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده است که مقاومت خمشی سطح مقطع‌های مختلف با هم مقایسه شوند و مقاومترین آن‌ها شناسایی شود. برای این منظور سه نوع شیپ مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. تمام نمونه‌ها روش تولید یکسان و حجم و ابعاد یکسان دارند و تنها تفاوت میان آن‌ها مربوط به هندسه‌ی شیپ است. نمونه‌های آزمایشی با کمک فناوری مدل سازی رسوب ذوب شده که یکی از پرکاربردترین فناوری‌های چاپ سه بعدی است تولید شده‌اند. برای اطمینان از یکسان بودن تمام عوامل به جز هندسه‌ی شیپ سعی شده تا همه‌ی شیپ‌ها دارای مساحت و ارتفاع یکسان باشند. علاوه بر این، تمام پارامترهای فرآیند در طی تولید قطعات یکسان است و ارزیابی وزن قطعات چاپ شده نشان می دهد که محاسبات انجام شده و تنظیمات اعمال شده به دستگاه چاپ سه بعدی درست بوده و نمونه‌ها دارای وزن یکسانی هستند. ماده‌ی اولیه‌ی مورد استفاده در این تحقیق پلی لاکتیک اسید است. این ماده یکی از پرکاربردترین مواد در چاپ سه بعدی بشمار می آید. خواص این ماده منجر به کاربردهای گسترده‌ی آن در حوزه‌های مختلف از جمله مهندسی بافت بدن انسان شده است.

مطابق داده‌های آزمایشی شیپ کلیدی شکل بیشترین میزان مقاومت و انرژی خمشی را داراست. شیپ V شکل و شیپ U شکل تقریباً مقاومت یکسانی از خود نشان داده‌اند اما میانگین مقاومت شیپ U شکل اندکی بیشتر است، با این حال انرژی خمشی شیپ U شکل به طور معناداری بیشتر از شیپ V شکل است. به طور کلی می توان گفت که شیپ کلیدی از همه مقاوم تر، شیپ V شکل از همه ضعیف تر و شیپ U شکل چیزی مابین این دو است. نتایج این آزمایش نشان می دهد که سطح مقطع دایره‌ای شکل قوی تر از سطح گوشه‌ی زاویه دار است. علاوه بر این شعاع دایره‌ی بزرگ تر مقاومت خمشی بیشتری خواهد داشت.

- [16] Fernandes, J., Deus, A. M., Reis, L., Vaz, M. F. and Leite, M., "Study of the Influence of 3d Printing Parameters on the Mechanical Properties of Pla" in Proceeding of 14-17.
- [17] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F. and Aliha, M., "Fracture Loads Prediction of the Modified 3d-Printed Abs Specimens under Mixed-Mode I/II Loading" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 235, pp. 107181, 2020.
- [18] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F. and Aliha, M., "Evaluation of the Geometrical Discontinuity Effect on Mixed-Mode I/II Fracture Load of Fdm 3d-Printed Parts" Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 113, pp. 102953, 2021.
- [19] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F. and Aliha, M., "Mixed-Mode Tensile/Shear Fracture of the Additively Manufactured Components under Dynamic and Static Loads" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 260, pp. 108185, 2022.
- [20] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F., Majidi, H. R. and Mohammad Aliha, M. R., "Mixed-Mode Load Bearing Estimation of the Cracked Additively Manufactured Materials Using Stress/Strain-Based Models" Rapid Prototyping Journal, Vol. 29, No. 2, pp. 218-231, 2023.
- [21] Shahbazian, B. and Mirsayar, M., "Fracture Mechanics of Cellular Structures: Past, Present, and Future Directions" Engineering Solid Mechanics, Vol. 11, No. 2, pp. 231-242, 2023.
- [22] Kafshgar, A. R., Rostami, S., Aliha, M. and Berto, F., "Optimization of Properties for 3d Printed Pla Material Using Taguchi, Anova and Multi-Objective Methodologies" Procedia Structural Integrity, Vol. 34, pp. 71-77, 2021.
- [23] Rajpurohit, S., Dave, H. and Rajurkar, K., "Prediction of Tensile Strength of Fused Deposition Modeling (Fdm) Printed Pla Using Classic Laminate Theory" Engineering Solid Mechanics, Vol. 10, No. 1, pp. 13-24, 2022.
- [24] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P. and Badrossamay, M., "Optimization of Fdm Process Parameters for Tensile Properties of Polylactic Acid Specimens Using Taguchi Design of Experiment Method" Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 35, No. 12, pp. 2435-2452, 2022.
- [25] Ansari-pour, A., Heidari-Rarani, M. and Mahshid, R., "A Review on 4d Printing of Polymers and Polymer Composites" Journal of Science and Technology of Composites, No. Articles in Press, 2023.
- [26] Sun, Q., Rizvi, G., Bellehumeur, C. and Gu, P., "Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of Fdm Polymer Filaments" Rapid prototyping journal, 2008.
- [27] Sood, A. K., Ohdar, R. K. and Mahapatra, S. S., "Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts" Materials & Design, Vol. 31, No. 1, pp. 287-295, 2010.
- [28] Montgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & sons, 2017.