مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، آذر 1399، دوره 7، شماره 9، ص‌ص. 42- 51

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

تأثیر تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی خواص خمشی قطعات کامپوزیتی پلی لاکتیک اسید/الیاف کوتاه کربن تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی

سید محسن موسوی کانی[1]، میلاد صادق یزدی[2*]، محمدهادی حسین زاده[1]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

* تهران، صندوق پستی 1698715461، msadeghy@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 اردیبهشت 1399

داوری اولیه 1 خرداد 1399

پذیرش: 11 تیر 1399

کلیدواژگان:

چاپ سه‌بعدی

مدل‌سازی با رسوب مذاب

کامپوزیت

پلی‌لاکتیک اسید

الیاف کوتاه کربن

چکیده

مدل‌سازی با رسوب مذاب یکی از روش‌های پیشرفته ساخت افزایشی است که امکان تولید قطعات پیچیده هندسی از مواد ترموپلاستیک را فراهم می‌کند. استفاده از فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب در تولید قطعات کامپوزیتی، زمان چرخه تولید را کوتاه کرده و هزینه‌های ساخت را کاهش می‌دهد. از آنجا که خواص قطعات تولید شده به کمک مدل‌سازی با رسوب مذاب به‌طور مشخص به پارامترهای فرآیند وابسته است، مطالعه و بررسی پارامترهای فرآیند و اثرات متفاوت آن‌ها بر خواص قطعات ساخته شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر اثر پارامترهای تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی خواص خمشی، نسبت استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان قطعات تولید شده به کمک مدل‌سازی با رسوب مذاب مورد مطالعه قرار گرفته است. ماده‌ی مورد بررسی در این مطالعه کامپوزیت پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کوتاه کربن است. نتایج نشان داد که تراکم پرشدن نسبت به الگوی چاپ اثرگذاری بیشتری بر روی استحکام خمشی، وزن و زمان ساخت قطعات دارد. این در حالی است که با در نظر گرفتن نسبت استحکام خمشی به وزن که مؤلفه‌ی مهم‌تری در ساخت قطعات کامپوزیتی است به عنوان خروجی مطلوب، الگوی چاپ نقش مهم‌تری را نسبت به تراکم پرشدن ایفاء می‌نماید.

Influence of infill density and printing pattern on flexural properties of 3D printed short carbon fiber PLA composite

Seyyed Mohssen Mousavi Kani, Milad Sadegh Yazdi*, Mohammad Hadi Hosseinzadeh

1- Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1698715461 Tehran, Iran, msadeghy@ihu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 8 May 2019
First Decision: 21 May 2020
Accepted: 1 July 2020

Keywords:
3D printing
FDM
Composite
PLA
Short carbon fiber

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) is one of the advanced Additive Manufacturing (AM) techniques that enables the production of complex geometric components from thermoplastic materials. The use of the FDM process in the production of composite parts reduces the production cycle time and manufacturing costs. Since the properties of components fabricated by this method depend on the process parameters, investigating of process parameters and their various effects on the properties of manufactured parts are so necessary. In the present study, the effect of two process parameters including printing pattern and infill density on flexural properties, flexural strength-to-weight, and flexural strength-to-time ratios of FDM fabricated parts have been studied. The investigation is carried out on carbon fiber reinforced Polylactic acid (SCF/PLA) composite. The results indicated that the infill density compared to the printing pattern had a more significant effect on the flexural strength, weight, and build time of fabricated parts. However, considering the flexural strength-to-weight ratio, which is an important factor in the production of the composite parts as a desirable output, the printing pattern plays a more important role than the infill density.

1- مقدمه

ساخت افزایشی[1] مطابق واژگان استاندارد برای این فناوری، به عنوان "فرآیند اتصال مواد به منظور ساخت اشیاء از داده‌های مدل سه‌بعدی، معمولاً به صورت لایه به لایه، برخلاف روش‌های ساخت کاهشی" تعریف شده است [1]. همچنین این فناوری با نام‌هایی از قبیل ساخت لایه‌ای، نمونه‌سازی سریع، ساخت سریع، ساخت به شکل دلخواه، ساخت دیجیتالی مستقیم و چاپ سه‌بعدی نیز شناخته می‌شود [2، 3]. توانایی فناوری ساخت افزایشی در تولید قطعات با هر هندسه پیچیده، حداقل نیاز به فرآیند پس-پردازش، اتلاف مواد نزدیک به صفر و به‌کارگیری دامنه وسیعی از مواد شامل پلاستیک‌ها، فلزات و سرامیک‌ها

[1] Additive Manufacturing (AM)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

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)

سبب شده است تا در بخش‌های مختلف صنعت نظیر خودروسازی، پزشکی و هوافضا به طور چشمگیر گسترش یابد [4- 8]. در حال حاضر تعداد زیادی از فرآیندهای ساخت افزایشی در دسترس هستند که در روش نشاندن لایه‌ها برای ساخت قطعات، در اصول عملکرد و در مواد مورد استفاده با هم تفاوت دارند [9- 12]. یکی از این روش‌ها مدل‌سازی با رسوب مذاب[1] است.

مدل‌سازی با رسوب مذاب در دهه 90 میلادی توسط شرکت استراتاسیس[2] در آمریکا ظهور یافت و در حال حاضر به طور معمول برای کاربردهایی نظیر مدل‌سازی، نمونه‌سازی و تولید قطعه نهایی استفاده می‌شود [13- 15]. در این فرآیند یک جسم فیزیکی مستقیماً از یک مدل طراحی شده به کمک رایانه با استفاده از نشاندن لایه به لایه ماده ساخته می‌شود [16- 18]. ماده تغذیه رشته‌ای شکل از جنس مواد ترموپلاستیک از درون نازلی که هندسه سطح مقطع قطعه را لایه به لایه دنبال می‌نماید، اکسترود می‌گردد [19، 20]. نازل حاوی گرم‌کن‌های مقاومتی است تا ماده تغذیه را در دمایی درست بالاتر از نقطه ذوبشان نگه دارد به گونه‌ای که ماده به راحتی درون نازل جریان یافته و لایه را تشکیل دهد. ماده اکسترود شده بلافاصله پس از جریان یافتن از نازل و متصل شدن به لایه زیرین سفت می‌شود. هنگامی که یک لایه ساخته شد، صفحه‌ی ساخت یا نازل در راستای محور عمود حرکت نموده و نازل اکستروژن لایه دیگری را می‌نشاند. این عمل تا کامل شدن فرآیند ساخت قطعه نهایی ادامه می‌یابد [19، 21، 22]. شکل 1 اصول فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب را نشان می‌دهد.

ماده اولیه برای چاپگرهای سه‌بعدی مدل‌سازی با رسوب مذاب به طور معمول مواد ترموپلاستیک نظیر آکریلونیتریل بوتادین استایرن[3]، نایلون، پلی‌لاکتیک اسید[4] و ترکیبات آن‌ها هستند [23، 24]. برای افزایش خواص مکانیکی قطعات ساخته شده باروش مدل‌سازی با رسوب مذاب از کامپوزیت‌های تقویت شده نیز به عنوان ماده اولیه این فرآیند استفاده می‌شود [25- 27]. کامپوزیت‌ها می‌توانند راه‌حل‌های مهندسی با وزن سبک ارائه دهند و دارای خواص برتر نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، خواص خستگی، خوردگی و مقاومت به سایش بسیار خوب و پایداری ابعادی بالا باشند. با توجه به این ویژگی‌های جذاب، کامپوزیت‌ها برای بسیاری از حوزه‌ها نظیر هوافضا، خودروسازی و دیگر بخش‌های صنعت به طور گسترده‌ای استفاده شده‌اند [28، 29]. به ویژه در صنایع هوافضا و ساخت هواپیمای تجاری به عنوان نمونه چیزی حدود 53 درصد از مواد موجود در بدنه هواپیمای ایرباس ای-350[5] از کامپوزیت‌ها ساخته شده‌اند [30].

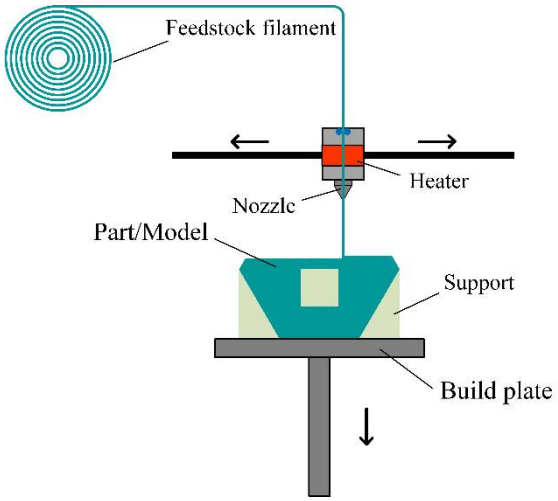

Fig. 1 Principle of the FDM process.

شکل 1 اصول فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب.

روش‌های مرسوم برای ساخت کامپوزیت‌ها یعنی فرآیندهای قالب-باز و قالب-بسته دارای معایبی از قبیل سیکل زمانی طولانی، هزینه تولید بالا و سختی ساخت برخی قطعات با ساختارهای پیچیده و توخالی هستند. تکنیک‌های ساخت افزایشی نظیر مدل‌سازی با رسوب مذاب نه‌تنها قادر به ساخت قطعات کامپوزیتی با ساختارهای توخالی و پیچیده است بلکه سیکل طراحی تا ساخت را کوتاه کرده و در نتیجه هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد [28].

خواص قطعات تولید شده به کمک مدل‌سازی با رسوب مذاب به وضوح به پارامترهای فرآیند وابسته است. این پارامترهای فرآیند اثرات متفاوتی دارند که نیازمند بررسی است [31]؛ بنابراین، انتخاب پارامترهای بهینه فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب موضوع بسیار مهمی است که در تحقیقات به آن پرداخته شده است.

محمد و همکاران [32] تأثیر پارامترهای فرآیند را بر روی خواص دینامیکی-مکانیکی و ویسکوالاستیک قطعات ساخته شده با مدل‌سازی با رسوب مذاب بررسی نمودند. آن‌ها در مطالعه خود تلاش نمودند با استفاده از روش سطح پاسخ و تحلیل‌های آماری، رابطه‌ای تجربی میان پارامترهای ورودی مدل‌سازی با رسوب مذاب و خواص به دست آمده برقرار کنند.

[1] Fused Deposition Modeling (FDM)
[2] Stratasys
[3] acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
[4] polylactic acid (PLA)
[5] Airbus A350

مطالعه آن‌ها نشان داد که ضخامت لایه، فاصله هم‌پوشانی، عرض مسیر و تعداد کانتورها پارامترهایی هستند که بیشترین میزان تأثیر را بر روی مدول خمشی دینامیکی و ویسکوزیته مختلط دارند. همچنین با افزایش تعداد کانتورها، عملکرد قطعه ساخته شده به‌طور چشمگیری بهبود یافت.

نینگ و همکاران [28] مطالعه‌ای در رابطه با تأثیرات پارامترهای فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلاستیک تقویت‌شده با رشته‌های کربن انجام دادند. آن‌ها در بررسی‌های تجربی خود اثرات پارامترهای فرآیند شامل زاویه رشته، سرعت پرشدن، دمای نازل و ضخامت لایه را بر روی خواص کششی قطعات ساخته شده به کمک مدل‌سازی با رسوب مذاب مورد ارزیابی قراردادند.

مانیکاندان و همکاران [33] به کمک چاپگرهای سه‌بعدی مدل‌سازی با رسوب مذاب، اثر پارامترهای فرآیند شامل کانتور، زاویه رشته، عرض رشته و فاصله‌ی هم‌پوشانی را بر روی استحکام خمشی و زبری سطح بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه رشته بیشترین تأثیر را بر استحکام خمشی داشته همچنین تعداد لایه‌های دور نمونه بیشترین تأثیر را در کاهش زبری سطح دارد. بیشترین مقدار استحکام خمشی، برای حالت تک کانتور، زاویه رشته 45 درجه، عرض رشته 0/6064 میلی‌متر و فاصله هم‌پوشانی بین لایه‌ها 0/00 میلی‌متر حاصل شد. همچنین بهترین صافی سطح برای حالت سه کانتور، زاویه رشته 45 درجه، عرض رشته 0/6064 میلی‌متر و فاصله هم‌پوشانی بین لایه‌ها 0/02 میلی‌متر به دست آمد.

تیان و همکاران [34] روابط و عملکرد کامپوزیت‌های پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با رشته کربن پیوسته را از طریق تحلیل تأثیرگذاری پارامترهای فرآیند بر روی دما و فشار در طول فرآیند مورد مطالعه قرار دادند. پارامترهای فرآیند نظیر دمای نازل، ضخامت لایه، نرخ تغذیه فیلامنت، فاصله هم‌پوشانی و سرعت حرکت عرضی بررسی و بر اساس اثرگذاری‌شان بر روی عملکرد نمونه‌های کامپوزیتی بهینه شدند. آن‌ها با بهینه‌سازی پارامترها به بیشینه استحکام خمشی 335 مگاپاسکال و مدول خمشی 30 گیگاپاسکال دست یافتند.

فرناندز ویسنته و همکاران [35] به بررسی تأثیر الگوی چاپ و تراکم پرشدن بر روی استحکام کششی ماده آکریلونیتریل بوتادین استایرن پرداختند. در این تحقیق سه نوع الگوی چاپ خطوط مستقیم، لانه زنبوری و خطی با مقادیر تراکم پرشدن 20%، 50% و 100% مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد الگوهای چاپ مختلف تنها 5 درصد در استحکام کششی تأثیرگذار می‌باشد در حالی که تراکم پرشدن تأثیر بسیار زیادی در افزایش استحکام کششی دارد. در نهایت نتایج نشان داد الگوی خطوط مستقیم با تراکم پرشدن 100% دارای بیشترین استحکام کششی به میزان 36/4 مگاپاسکال می‌باشد.

تسوکنیداس و همکاران [36] به کمک فناوری مدل‌سازی با رسوب مذاب تأثیر ارتفاع لایه، الگوی چاپ و تراکم پرشدن بر روی استحکام فشاری و خواص جذب انرژی ماده پلی‌لاکتیک اسید چاپ‌شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد تراکم پرشدن بیشترین تأثیر را بر استحکام فشاری قطعات چاپ شده خواهد داشت. همچنین برای تعیین خواص ضربه‌ای ماده، نمونه‌های آزمایش به شکل استوانه‌ای تهیه و با استفاده از دستگاه تست سقوط آزاد آزمایش‌ها انجام شد. درنهایت به کمک تحلیل واریانس[1] آزمایش‌ها طبقه‌بندی و نتایج بهینه شده است. مطالعات آن‌ها نشان داد پارامتری که بیشترین اثر را بر روی جذب انرژی ضربه دارد، تراکم پرشدن نمونه‌ها است به گونه‌ای که هر چقدر تخلخل نمونه بیشتر، میزان جذب انرژی نیز افزایش خواهد یافت.

کریستین و همکاران [37] تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های آکریلونیتریل بوتادین استایرن ساخته شده به روش چاپ سه‌بعدی را بررسی نمودند. در این تحقیق ضخامت لایه و سرعت چاپ به عنوان پارامترهای فرآیند مورد توجه قرار گرفتند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که سرعت کم چاپ و ضخامت لایه کم در مقایسه با دیگر ترکیبات پارامترهای فرآیند بیشترین استحکام کششی و خمشی را نتیجه می‌دهند.

اکوبال و همکاران [38] مطالعه‌ای در خصوص بهینه‌سازی پارامتری قطعات آکریلونیتریل بوتادین استایرن ساخته شده به وسیله مدل‌سازی با رسوب مذاب به منظور بهبود دقت ابعادی آن‌ها انجام دادند. سه پارامتر مهم که برای بهینه‌سازی در این مطالعه مورد توجه قرار گرفت زاویه رشته، فاصله هم‌پوشانی و پهنای رشته بود. همچنین جهت صحت سنجی آزمایش مدل‌ها از تحلیل واریانس استفاده شد. آن‌ها در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که دقت ابعادی به طور عمده متأثر از زاویه رشته است و پارامترهای دیگر فرآیند شامل پهنای رشته و فاصله هم‌پوشانی اثر قابل توجهی بر روی دقت ابعادی ندارد.

کوزنتسف و همکاران [39] به کمک فناوری مدل‌سازی با رسوب مذاب به بررسی تأثیر قطر نازل و ارتفاع لایه بر روی استحکام نمونه‌های پلی‌لاکتیک اسید در تست خمش سه نقطه پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد افزایش ضخامت موجب

[1] Analysis of Variance (ANOVA)

کاهش استحکام و افزایش قطر نازل باعث افزایش استحکام می‌شود.

ژنگ و همکاران [40] استحکام چسبندگی بین سطحی قطعات ساخته شده از فیلامنت‌های آکریلونیتریل بوتادین استایرن، آکریلونیتریل بوتادین استایرن تقویت شده با نانولوله کربن و آکریلونیتریل بوتادین استایرن تقویت شده با فیبر کوتاه کربن به وسیله مدل‌سازی با رسوب مذاب را بررسی نمودند. آن‌ها آزمایش‌های خود را به کمک دو روش تست برش کششی صفحه‌ای و تست برش شکاف دوبل با استفاده از نمونه‌های °45± انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استحکام برشی کشش صفحه‌ای نمونه تقویت شده با فیبر کوتاه کربن نزدیک به نمونه تقویت شده با نانولوله کربن و مقادیر هر دوی آن‌ها بیشتر از استحکام نمونه آکریلونیتریل بوتادین استایرن خالص بوده است. همچنین نتایج نشان داد که استحکام برشی نمونه‌های تقویت شده با فیبر کوتاه کربن با افزایش سرعت چاپ و ضخامت لایه کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج این تحقیق، بیشتر بودن تخلخل نمونه‌های تقویت شده با فیبر کوتاه کربن در مقایسه با نمونه‌های آکریلونیتریل بوتادین استایرن خالص و نمونه‌های تقویت شده با نانولوله کربن در جهت رشته متناظر، به ویژه برای نمونه‌های °45± بوده است.

پاپون و همکاران [41] خواص شکست قطعات پلی‌لاکتیک اسید و کامپوزیت‌های پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کوتاه کربن تولید شده به کمک فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب را مطالعه نمودند. آن‌ها در بررسی‌های خود دو پارامتر هندسه نازل و جهت چاپ را مورد توجه قرار دادند. آن‌ها نمونه‌ها را با استفاده از نازل‌های مربعی-شکل و دایره‌ای-شکل در دو جهت °45/−45° و °0/90° چاپ نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از بهبود قابل توجه سفتی و انرژی شکست برای کامپوزیت‌های پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کوتاه کربن در مقایسه با پلی‌لاکتیک اسید خالص بود. همچنین بررسی آن‌ها نشان داد نمونه‌های چاپ شده توسط نازل مربعی-شکل در مقایسه با نازل دایره‌ای-شکل مقداری بهبود در سفتی شکست به همراه حفره‌های درون لایه‌ای کمتر و نواحی اتصال بیشتری هستند.

آو و همکاران [42] اثر پارامترهای چاپ بر روی خواص کششی، دینامیک-مکانیکی و ترموالکتریکی کامپوزیت‌های آکریلونیتریل بوتادین استایرن رسانا/ زینک اکساید ساخته شده به وسیله مدل‌سازی با رسوب مذاب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر دو پارامتر تراکم پرشدن و الگوی چاپ را مطالعه نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داد استحکام کششی، مدول یانگ، مدول انباره دینامیکی و رسانایی حرارتی و الکتریکی با افزایش تراکم پرشدن بهبود و ازدیاد طول در شکست و ضریب میرایی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که الگوی چاپ خطی خصوصاً در خواص کششی و رسانایی الکتریکی بهتر از الگوی چاپ خطوط مستقیم است.

با توجه به آنچه بیان شد، تراکم پرشدن و الگوی چاپ پارامترهایی هستند که بر روی خواص مکانیکی قطعات تولید شده به کمک مدل‌سازی با رسوب مذاب اثر قابل توجهی می‌گذارند. در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای فرآیند شامل تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی خواص خمشی قطعات کامپوزیتی ساخته شده با فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب مورد بررسی قرار گرفته است. ماده مورد استفاده در این بررسی کامپوزیت پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کوتاه کربن است که تا کنون مطالعات زیادی روی آن در مقالات انجام نشده است. علاوه بر این، در این کار خواص خمشی قطعات چاپ شده سه‌بعدی ارائه شد که در آثار قبلی برای ماده کامپوزیت پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کوتاه کربن انجام نشده است. همچنین جهت تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترهای فرآیند بر روی نسبت استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان از تحلیل واریانس استفاده شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- ماده و دستگاه ساخت افزایشی

پلی‌لاکتیک اسید ماده‌ای است که به طور معمول در فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب استفاده می‌شود. پلی‌لاکتیک اسید یک پلیمر زیستی است که از منابع تجدید پذیر تولید می‌شود و ساختار مناسب آن، این ماده را به یک گزینه بسیار خوب برای فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب تبدیل می‌کند. خواص مکانیکی این ماده، استفاده از قطعات ساخته شده با آن را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها ممکن می‌سازد [43]. ماده استفاده شده در این مطالعه پلیمر پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با 10 درصد وزنی الیاف کوتاه کربن ساخت شرکت "ZIRO 3D، کشور چین" است. قطر فیلامنت 1/75 میلی‌متر است. همچنین دمای انتقال شیشه‌ای[1] این ماده 65-60 درجه سانتیگراد می‌باشد. دستگاه به کار گرفته‌شده جهت آماده‌سازی نمونه‌های تست "کوانتوم[2]" ساخت شرکت "چاپگر سه‌بعدی پرشیا" است. این دستگاه دارای ابعاد ساخت 300×250×300 میلی‌متر مکعب می‌باشد.

[1] glass transition temperature (T_g)
[2] Quantum

2-2- پارامترهای فرآیند و آماده‌سازی نمونه

تراکم پرشدن و الگوی چاپ به عنوان پارامترهای فرآیند برای این مطالعه انتخاب شده‌اند. الگوی چاپ به مسیر پیمایش نازل در هر لایه از سطح مقطع اشاره دارد. در تحقیق حاضر سه نوع الگوی هم‌مرکز[1]، خطوط مستقیم[2] و هیلبرت[3] اتخاذ شده است. شماتیک این الگوها در شکل 2 نشان داده شده است. تراکم پرشدن درصدی از ناحیه سطح مقطع است که نازل طی پیمایش هر لایه پوشش می‌دهد. در این مطالعه برای هر الگو چهار سطح تراکم پرشدن 25%، 50%، 75% و 100% تعریف شده است. به منظور بررسی اثر این دو پارامتر فرآیند بر روی استحکام خمشی، وزن و زمان ساخت قطعات از طراحی فاکتوریل چندسطحی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. برای این هدف، نرم‌افزار "Design Expert، نسخه 12" به کارگیری شد. جدول 1 جدول طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. نمونه‌ها مطابق تست استاندارد خمش D790[4] با ابعاد نشان داده شده در شکل 3 آماده گردید. پارامترهای ثابت فرآیند و مقادیر آن‌ها نیز در جدول 2 آمده است.

3-2- روش آزمایش

در این تحقیق تجربی از دستگاه تست سروو-الکترومکانیکی شرکت سنتام[5] با ظرفیت 20 کیلو نیوتن استفاده شده است. تست خمش با قرارگیری نمونه‌ها بر روی دو تکیه‌گاه و اعمال نیرو از طریق پین بارگذاری با شعاع 20 میلی‌متر انجام شد. بارگذاری نمونه‌ها تا زمان شکست با سرعت 2/2 میلی‌متر بر ثانیه ادامه یافت.

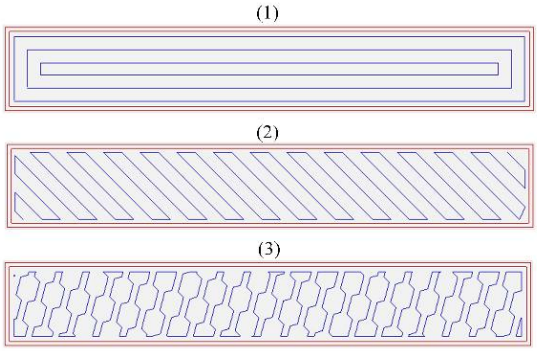

Fig. 2 Printing patterns, (1) Concentric, (2) rectilinear and (3) Hilbert.

شکل 2 الگوهای چاپ، (1) هم‌مرکز، (2) خطوط مستقیم و (3) هیلبرت.

[1] Concentric
[2] Rectilinear
[3] Hilbert
[4] ASTM D790
[5] SANTAM

جدول 1 جدول طراحی آزمایش

Table 2 Design of experiment table

شماره آزمایش	پارامترهای فرآیند	
	تراکم پرشدن	الگوی چاپ
1	%25	هیلبرت
2	%50	هیلبرت
3	%25	هم‌مرکز
4	%25	خطوط مستقیم
5	%100	هم‌مرکز
6	%100	هیلبرت
7	%75	هیلبرت
8	%75	هم‌مرکز
9	%75	خطوط مستقیم
10	%100	خطوط مستقیم
11	%50	خطوط مستقیم
12	%50	هم‌مرکز

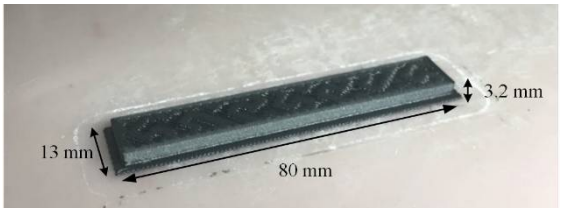

Fig. 3 Dimension of flexural test sample.

شکل 3 ابعاد نمونه تست خمش.

جدول 2 پارامترهای ثابت فرآیند و مقادیر آن‌ها

Table 2 Process constant parameters and their values

پارامتر	واحد	مقدار
دمای نازل	°C	200
دمای بستر	°C	50
قطر نازل	mm	0/4
ضخامت لایه‌ها	mm	0/2
ضخامت دیواره‌ها	mm	0/3
ضخامت لایه زیرین	mm	0/4
ضخامت لایه فوقانی	mm	0/4
الگوی لایه‌های زیرین/ فوقانی	-	خطی
سرعت چاپ	mm/s	20

شماتیک تست خمش سه نقطه‌ای در شکل 4 نشان داده شده است.

تنش خمشی حاصل از تست خمش سه نقطه‌ای از رابطه (1) به دست می‌آید [44]:

$$\sigma_f = \frac{FL}{2bd^2} \quad (1)$$

که در آن σ_f، تنش خمشی در بیرونی‌ترین سطح نمونه آزمایش در نقطه میانی، F، نیروی اعمال شده در نقطه میانی

نمونه، L، طول دهانه بین پایه‌های دستگاه آزمایش، b، عرض نمونه مورد آزمایش و d، ضخامت نمونه مورد آزمایش است.

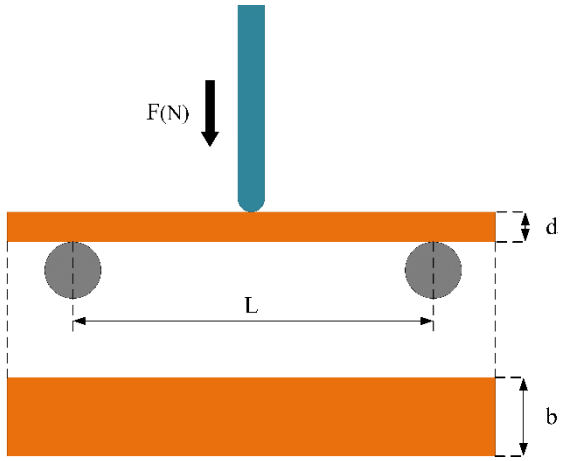

Fig. 4 Schematic of the three-point flexural test.

شکل 4 شماتیک تست خمش سه نقطه.

4-2- تحلیل واریانس

تحلیل واریانس یک روش آماری است که به ما امکان می‌دهد اهمیت نسبی پارامترهای مختلف فرآیند که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند، تخمین بزنیم [45]. به بیانی دیگر تحلیل واریانس یکی از تحلیل‌های پرکاربرد است که با بهره‌گیری از آن می‌توان درصد مشارکت هر متغیر بر خروجی‌های مسئله را مشخص نمود [46، 47]. درصد مشارکت هر متغیر از رابطه (2) به دست می‌آید [48]:

$$P_A = \frac{S_A}{S_T} \times 100 \qquad (2)$$

که در آن P_A نشان‌دهنده درصد مشارکت متغیر A در خروجی مورد بررسی، S_A و S_T به ترتیب بیان‌کننده مجموع مربعات اثر متغیر و مجموع مربعات کل می‌باشند که از روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$S_A = \sum \frac{A_i^2}{N_{A_i}} - C.F. \qquad (3)$$

$$S_T = \sum Y_i^2 - C.F. \qquad (4)$$

$$C.F. = \frac{T^2}{N} \qquad (5)$$

$$T = Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_i \qquad (6)$$

در این روابط A_i نشان‌دهنده مجموع خروجی آزمایش‌هایی است که در آن‌ها متغیر A در سطح i قرار دارد. در مسائل موجود، معمولاً چند متغیر با سطوح مختلف وجود دارد که برای نمایش متغیرها عموماً از حروف بزرگ مانند A و B و C و برای نمایش سطوح هرکدام از آن‌ها از یک اندیس کوچک در کنار حرف استفاده می‌شود. به طور مثال A_1 به عنوان متغیر A در سطح 1 خود شناخته می‌شود. N_{A_i} تعداد تکرار آزمایش‌های انجام شده برای A_i، Y_i نتایج به دست آمده از هر آزمایش، C.F. فاکتور تصحیح و N تعداد آزمایش‌ها می‌باشد. به منظور تحلیل داده‌ها در این مسئله، دو متغیر یا فاکتور تراکم پرشدن و الگوی چاپ را داریم که به ترتیب دارای 4 و 3 سطح می‌باشند. با استفاده از روابط ذکر شده، میزان تأثیر هر متغیر بر خروجی‌ها به دست می‌آید.

3- بحث و نتایج

شکل 5 اثر تراکم پرشدن و الگوی چاپ را بر روی استحکام خمشی نمونه‌ها نشان می‌دهد. برای هر سه الگوی چاپ با افزایش تراکم پرشدن، استحکام خمشی افزایش یافته است. استحکام خمشی نمونه‌های هم‌مرکز برای تراکم پرشدن 25%، 50%، 75% و 100% به ترتیب 22/36، 27/53، 38/03 و 42/15 مگاپاسکال بوده است. برای نمونه‌های ساخته شده با الگوی چاپ خطی با تغییر تراکم از 25% به 100% استحکام خمشی 73/7% افزایش یافت. استحکام خمشی نمونه‌های چاپ شده با الگوی هیلبرت از تراکم پرشدن 25% تا 75%، 24/7% افزایش یافت در حالی که از تراکم پرشدن 75% به 100% استحکام خمشی به یک‌باره بهبود 56 درصدی داشته است. بیشترین استحکام خمشی 42/15 مگاپاسکال برای ترکیب الگوی چاپ هم‌مرکز و تراکم پرشدن 100% به دست آمد. در تراکم پرشدن زیاد، فضای خالی میان خطوط چاپ شده کمتر و میزان چسبندگی هر لایه به لایه بعدی بیشتر است، در نتیجه قطعه مستحکم‌تر و در برابر تنش‌های وارده مقاوم‌تر خواهد بود که با نتایج حاصل از مطالعه پاتل [49] مطابقت دارد.

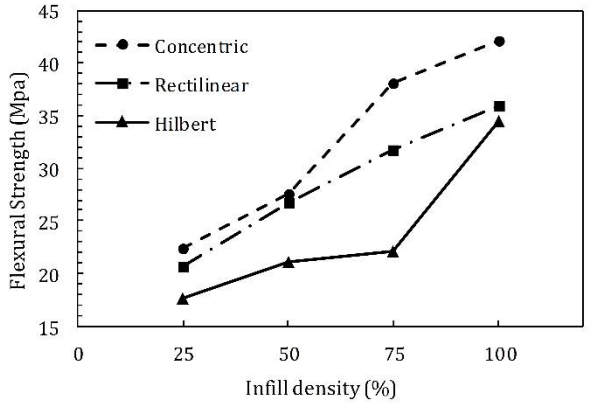

Fig. 5 Effect of infill density and printing pattern on the flexural strength.

شکل 5 اثر تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی استحکام خمشی نمونه‌ها.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روند افزایش استحکام

خمشی در اثر تغییر تراکم در هر الگو متفاوت است. این مسئله را می‌توان در تغییر میزان فضای خالی ایجاد شده در هر الگو جستجو کرد. روند افزایش استحکام خمشی در الگوی خطوط مستقیم و هم‌مرکز تقریباً ثابت، و در هر دو الگوی چاپ، پیمایش‌های نازل در تراکم‌های مختلف مشابه بوده و صرفاً مقدار پیمایش آن افزایش می‌یابد. الگوی چاپ هیلبرت همان‌گونه که نتایج استحکام خمشی نشان داده است به طور کلی در برابر خمش استحکام مطلوبی نداشته و علت جهش یکباره استحکام از تراکم پرشدن 75% به 100% را می‌توان بیشینه شدن چسبندگی میان لایه‌ها و به حداقل رسیدن فضاهای خالی دانست.

با توجه به نتایج به دست آمده، در تمامی تراکم‌های پرشدن، الگوی چاپ هم‌مرکز دارای بیشترین استحکام خمشی بوده است.

پس از الگوی چاپ هم‌مرکز، الگوی خطوط مستقیم و الگوی هیلبرت به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام خمشی را برای قطعات حاصل نمودند. با توجه به اینکه در خمش، قطعه در راستای طول و حول تار خنثی تحت تنش‌های کششی و فشاری قرار می‌گیرد، هرچه رشته‌های طولی بیشتر باشند استحکام قطعه بیشتر خواهد بود. بنابراین در الگوی هم‌مرکز به این علت که رشته‌ها غالباً در راستای طول قطعه چاپ شده‌اند استحکام خمشی بیشتر است. در الگوی خطوط مستقیم نیز با توجه به اینکه زاویه رشته‌های چاپ شده نسبت به محور طولی کمتر است بنابراین برآیند رشته‌هایی که در راستای طول چاپ شده‌اند در این الگو نسبت به الگوی هیلبرت بیشتر و در نتیجه استحکام خمشی به دست آمده از آن در مقایسه با الگوی هیلبرت بیشتر است. علاوه بر این در الگوی هیلبرت به علت وجود تغییر مسیرهای متعدد رشته‌های چاپ شده، محل این تغییر مسیرها به مکان‌هایی بالقوه برای تمرکز تنش تبدیل و در نتیجه استحکام قطعات چاپ شده با این الگو کاهش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان گفت که فارغ از میزان تراکم، الگوی چاپ هم‌مرکز در ساخت قطعات بسیار مؤثر بوده و با استفاده از آن می‌توان قطعاتی با استحکام بیشتر تولید نمود.

پس از بررسی استحکام خمشی قطعات ساخته شده با چاپگر سه‌بعدی، اثر پارامترهای فرآیند بر زمان ساخت و وزن قطعات تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی وزن قطعات تولید شده با چاپگر سه‌بعدی همان‌گونه که در شکل 6 نشان داده شده است، به وضوح با افزایش تراکم پرشدن، وزن نمونه‌ها نیز افزایش یافت اما وزن نمونه‌های ساخته شده با الگوهای چاپ مختلف در یک تراکم پرشدن ثابت یکسان نبود. این نتیجه نشان می‌دهد که در الگوهای چاپ متفاوت به دلیل پیمایش مسیر مختلف نازل، میزان ماده اکسترود شده نیز یکسان نیست و به شدت بر روی وزن نمونه‌ها مؤثر است. در این مطالعه برای تراکم پرشدن 50%، 75% و 100% الگوی خطوط مستقیم و الگوی هم‌مرکز به ترتیب بیشترین و کم‌ترین وزن را داشتند. برای تراکم پرشدن 25% نتیجه متفاوت بوده و الگوی هیلبرت کمترین وزن و الگوی هم‌مرکز دارای بیشترین وزن بوده است.

با افزایش تراکم پرشدن، مسیر پیمایش نازل طولانی‌تر شده و به تبع آن زمان ساخت قطعه نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل 7 نشان داده شده است در یک تراکم پرشدن ثابت، الگوی هیلبرت دارای بیشترین زمان ساخت و دو الگوی دیگر از نظر زمان ساخت برابر بوده‌اند.

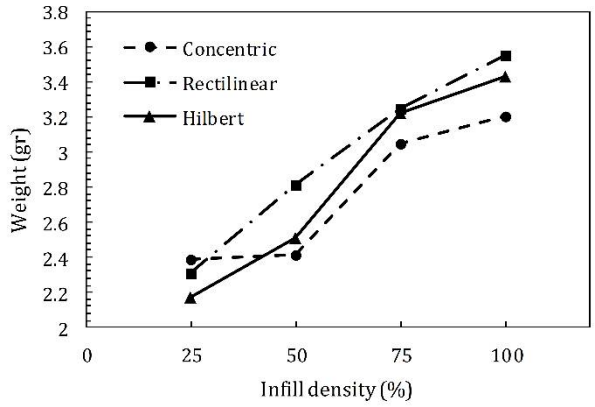

Fig. 6 Effect of infill density and printing pattern on the weight of specimens.

شکل 6 اثر تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی وزن نمونه‌ها.

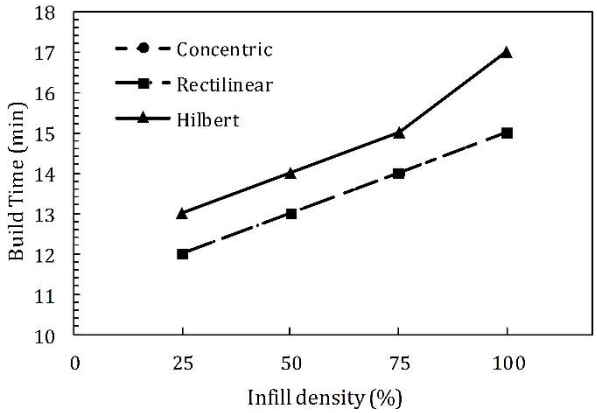

Fig. 7 Effect of infill density and printing pattern on the build time of specimens.

شکل 7 اثر تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی زمان ساخت نمونه‌ها.

الگوی هیلبرت با توجه به ماهیت خود که دارای تغییر مسیرهای متعدد است مسیر پیمایش نازل را افزایش داده در نتیجه زمان ساخت بیشتری خواهد داشت. هر چه ابعاد قطعات تولید شده با

چاپگر سه‌بعدی بیشتر باشد، اختلاف زمانی برای الگوهای چاپ متفاوت، بیشتر مشخص می‌شود.

پس از بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر خروجی‌های آزمایش، تحلیل واریانس به‌منظور تعیین میزان اثر هر پارامتر بر هر یک از خروجی‌های آزمایش انجام گرفته است. تعیین میزان اثر هر متغیر و تحلیل آن مهم‌ترین بخش در مبحث تحلیل واریانس است. در این قسمت علاوه بر سه خروجی اصلی یعنی استحکام خمشی، وزن و زمان ساخت نمونه‌ها، دو خروجی ترکیبی و کاربردی یعنی نسبت استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جدول 3 نتایج کامل تحلیل واریانس را نشان می‌دهد.

در گام اول اثر دو پارامتر بر خروجی استحکام خمشی نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشخص شد که تأثیر دو پارامتر تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر استحکام خمشی به ترتیب 68/68% و 31/32% است و می‌توان گفت که اثر تراکم پرشدن تقریباً 2 برابر اثر الگوی چاپ می‌باشد. اثر تراکم پرشدن بر روی زمان ساخت با 74/52% غلبه تقریباً 3 برابری نسبت به اثر الگوی چاپ با 25/48% دارد. در مورد خروجی وزن، اثر تراکم پرشدن 94/28% بسیار بیشتر از اثر الگوی چاپ بوده است. همان‌گونه که پیش از این بیان شد نسبت استحکام خمشی به وزن، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های فرآیند ساخت قطعات کامپوزیتی محسوب می‌گردد. نتایج جدول 3 نشان می‌دهد که الگوی چاپ با تأثیر 66/25% که تقریباً 2 برابر تأثیر تراکم پرشدن با 33/75% است، نقش مؤثرتری در نسبت استحکام خمشی به وزن قطعات ساخته شده ایفا می‌کند. در واقع الگوهای چاپ متفاوت منجر به اتصال رشته‌های چاپ شده در ساختارهای ویژه‌ای می‌گردند که می‌توانند در مقایسه با تراکم پرشدن‌های مختلف نسبت استحکام به وزن بالاتری فراهم نمایند. نسبت استحکام خمشی به زمان نیز با 79/77% به میزان زیادی به الگوی چاپ وابسته است. دستیابی به استحکام بالا در کوتاه‌ترین زمان نیز یکی دیگر از ایده آل‌های فرآیند ساخت محسوب می‌گردد، زیرا با کوتاه شدن زمان ساخت هزینه نیز کاهش می‌یابد. میزان وابستگی نسبت استحکام خمشی به زمان به الگوی چاپ نشان داد که با استفاده از الگوهای چاپ مختلف می‌توان در کوتاه‌ترین زمان بدون نیاز به مصرف ماده اولیه بیشتر و تراکم پرشدن زیاد به استحکام‌های مطلوب دست یافت.

تراکم پرشدن قطعات به مراتب پارامتر تأثیرگذارتری نسبت به الگوی چاپ بود در صورتی که برای خروجی‌های ترکیبی شامل نسبت استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان این موضوع کاملاً به عکس بوده و تأثیرگذاری الگوی چاپ بسیار بیشتر از تراکم پرشدن قطعات می‌باشد؛ به عبارت دیگر اثر پارامتر الگوی چاپ در خروجی‌های ترکیبی نمود بسیار بیشتری دارد.

جدول 3 نتایج تحلیل واریانس

Table 3 Results of analysis of variance

پارامتر	میزان تأثیر (%)				
	استحکام خمشی	زمان	جرم	استحکام/ جرم	استحکام/ زمان
درصد پرشدن	68/68	74/52	94/28	33/75	20/23
الگوی پرشدن	31/32	25/48	5/72	66/25	79/77

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرآیند شامل تراکم پرشدن و الگوی چاپ بر روی خواص خمشی، وزن و زمان و همچنین مؤلفه‌های ترکیبی نبست استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان قطعات ساخته شده به وسیله فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه بر روی نمونه‌های کامپوزیتی پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف کربن که با دستگاه مدل‌سازی با رسوب مذاب کوانتوم تولید شده‌اند، صورت گرفت. در این مطالعه به منظور تعیین درصد مشارکت هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر خروجی‌های مدنظر فرآیند از تحلیل واریانس استفاده شد. نتایج نشان داد که از میان سه الگوی چاپ هم‌مرکز، خطی و هیلبرت قطعاتی که با الگوی هم‌مرکز ساخته شده بودند برای همه تراکم پرشدن‌های 50%، 75% و 100% از استحکام خمشی بیشتری برخوردار بودند. بیشترین استحکام خمشی برای تراکم 100% با مقدار 42/15 مگاپاسکال حاصل شد. با افزایش تراکم پرشدن استحکام خمشی افزایش یافته است با این حال روند افزایش استحکام خمشی برای هر الگو متفاوت بود. وزن و زمان ساخت قطعات تولید شده به طور قابل توجهی به الگوی چاپ وابسته بود. الگوی هیلبرت در مقایسه با سایر الگوها به مدت زمان ساخت بیشتری نیاز داشت در حالی که الگوی خطوط مستقیم قطعاتی با وزن بیشتر تولید نمود. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که تراکم پرشدن با میزان تأثیر 68/68%، 94/28% و 74/52% به ترتیب برای استحکام خمشی، وزن و زمان ساخت قطعات نسبت به الگوی چاپ نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. این در حالی است که با در نظر گرفتن مؤلفه‌های مهمی چون نسبت استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان به عنوان خروجی مطلوب، نتایج چیز دیگری را نشان می‌داد. الگوی چاپ با میزان

تأثیر 66/25% و 79/77% به ترتیب برای نسبت استحکام خمشی به وزن و نسبت استحکام خمشی به زمان اثرگذاری به مراتب بیشتری در مقایسه با تراکم پرشدن از خود نشان داد. این موضوع خاطر نشان می‌کند که در میان پارامترهای فرآیند مدل‌سازی با رسوب مذاب توجه به الگوی چاپ به عنوان یک متغیر اصلی امری کاملاً ضروری است.

5- مراجع

[1] *F2792. 2012. standard terminology for additive manufacturing technologies*, 2012.

[2] L. Chen, Y. He, Y. Yang, S. Niu, and H. Ren, "The research status and development trend of additive manufacturing technology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 9-12, pp. 3651-3660, 2017.

[3] N. Guo and M. C. Leu, "Additive manufacturing: technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 215-243, 2013.

[4] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, "Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 1-4, pp. 389-405, 2016.

[5] J. Gardan, "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends," *International Journal of Production Research*, Vol. 54, No. 10, pp. 3118-3132, 2016.

[6] I. Gibson, "The changing face of additive manufacturing," *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 28, No. 1, pp. 10-17, 2017.

[7] B. Lyons, "Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook," *The Bridge*, Vol. 44, No. 3, 2014.

[8] C. Ferro, R. Grassi, C. Seclì, and P. Maggiore, "Additive manufacturing offers new opportunities in UAV research," *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 1004-1010, 2016.

[9] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *Additive Manufacturing*, Vol. 20, pp. 44-67, 2018.

[10] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.

[11] A. Gebhardt, "Understanding additive manufacturing," 2011.

[12] K. V. Wong and A. Hernandez, "A review of additive manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2012, 2012.

[13] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects," *Advances in Manufacturing*, Vol. 3, No. 1, pp. 42-53, 2015.

[14] R. Noorani, "Rapid prototyping: principles and applications," 2006.

[15] S. H. Masood, "Introduction to advances in additive manufacturing and tooling," 2014.

[16] S. H. Masood, "Advances in fused deposition modeling," 2014.

[17] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," *Rapid Prototyping Journal*, 2014.

[18] L. Novakova-Marcincinova and I. Kuric, "Basic and advanced materials for fused deposition modeling rapid prototyping technology," *Manuf. and Ind. Eng*, Vol. 11, No. 1, pp. 24-27, 2012.

[19] L. Novakova-Marcincinova, "Application of fused deposition modeling technology in 3D printing rapid prototyping area," *Manuf. and Ind. Eng*, Vol. 11, No. 4, pp. 35-37, 2012.

[20] P. Dudek, "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements," *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 58, No. 4, pp. 1415-1418, 2013.

[21] J. E. LaBossiere and M. E. Eshelman, "Rapid prototyping system with controlled material feedstock," ed: Google Patents, 2008.

[22] H. L. Oo, K. Z. Ye, and Y. H. Linn, "Modeling and controlling of temperature in 3D printer (FDM)," in *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 1738-1742: IEEE.

[23] A. Q. Pan, Z. F. Huang, R. J. Guo, and J. Liu, "Effect of FDM process on adhesive strength of polylactic acid (PLA) filament," in *Key Engineering Materials*, 2016, Vol. 667, pp. 181-186: Trans Tech Publ.

[24] E. Pei, J. Shen, and J. Watling, "Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 556-571, 2015.

[25] Z. Weng, J. Wang, T. Senthil, and L. Wu, "Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing," *Materials & Design*, Vol. 102, pp. 276-283, 2016.

[26] W. Hao, Y. Liu, H. Zhou, H. Chen, and D. Fang, "Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites," *Polymer Testing*, Vol. 65, pp. 29-34, 2018.

[27] H. L. Tekinalp *et al.*, "Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing," *Composites Science and Technology*, Vol. 105, pp. 144-150, 2014.

[28] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 80,

for minimiizing its dimensional inaccuracy," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development,* Vol. 7, No. 2, pp. 57-65, 2017.

[39] V. Kuznetsov, A. Solonin, O. Urzhumtsev, R. Schilling, and A. Tavitov, "Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process," *Polymers,* Vol. 10, No. 3, p. 313, 2018.

[40] W. Zhang *et al.*, "Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling," *Composites Part B: Engineering,* Vol. 137, pp. 51-59, 2018.

[41] Y. Aw, C. Yeoh, M. Idris, P. Teh, K. Hamzah, and S. Sazali, "Effect of printing parameters on tensile, dynamic mechanical, and thermoelectric properties of FDM 3D printed CABS/ZnO composites," *Materials,* Vol. 11, No. 4, p. 466, 2018.

[42] E. A. Papon and A. Haque, "Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites," *Additive Manufacturing,* Vol. 26, pp. 41-52, 2019.

[43] V. Kovan, T. Tezel, H. Camurlu, and E. Topal, "Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/carbon fibre composites," *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations.,* Vol. 4, No. 4, pp. 126-128, 2018.

[44] *D790-03*, 2003.

[45] R. A. Kishore, M. Sanghadasa, and S. Priya, "Optimization of segmented thermoelectric generator using Taguchi and ANOVA techniques," *Scientific reports,* Vol. 7, No. 1, p. 16746, 2017.

[46] B. M. Gopalsamy, B. Mondal, and S. Ghosh, "Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization ofhard machining while machining hardened steel," 2009.

[47] J. A. Ghani, I. Choudhury, and H. Hassan, "Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters," *Journal of materials processing technology,* Vol. 145, No. 1, pp. 84-92, 2004.

[48] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method.* Society of Manufacturing Engineers, 2010.

[49] D. Patel, "Effects of infill patterns on time, surface roughness and tensile strength in 3D printing," *Int. J. Eng. Dev. Res,* Vol. 5, pp. 566-569, 2017.

pp. 369-378, 2015.

[29] M. Yakout and M. Elbestawi, "Additive manufacturing of composite materials: an overview," in *6th International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT), Montréal, May 29th–June 2nd*, 2017.

[30] G. Marsh, "Wing worker for the world," *Reinforced Plastics,* Vol. 54, No. 3, pp. 24-28, 2010.

[31]] A. Gebisa and H. Lemu, "Investigating effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment," *Materials,* Vol. 11, No. 4, p. 500, 2018.

[32] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Experimental investigations of process parameters influence on rheological behavior and dynamic mechanical properties of FDM manufactured parts," *Materials and Manufacturing Processes,* Vol. 31, No. 15, pp. 1983-1994, 2016.

[33] S. Manikandan, A. S. Kumar, C. Sharma, V. P. Raja, and A. Adhiyamaan, "Investigation on the effect of fused deposition modeling process parameters on flexural and surface roughness properties of PC-ABS blend," *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering,* Vol. 2, No. 8, pp. 41-47, 2015.

[34] X. Tian, T. Liu, C. Yang, Q. Wang, and D. Li, "Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* Vol. 88, pp. 198-205, 2016.

[35] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, and A. Conejero, "Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing," *3D printing and additive manufacturing,* Vol. 3, No. 3, pp. 183-192, 2016.

[36] A. Tsouknidas, M. Pantazopoulos, I. Katsoulis, D. Fasnakis, S. Maropoulos, and N. Michailidis, "Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling," *Materials & Design,* Vol. 102, pp. 41-44, 2016.

[37] K. J. Christiyan, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu, "A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol. 114, No. 1, p. 012109: IOP Publishing.

[38] A. Equbal, A. K. Sood, A. Ansari, and A. Equbal, "Optimization of process parameters of FDM part